

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ЦЕНТР СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО,  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

*А. Г. Ганиев, А. К. Авлиякулов,  
Г. А. Алмардонова*

# ФИЗИКА

(часть I)

*Учебник для академических лицеев и  
профессиональных колледжей*

ИЗДАТЕЛЬСКО-ПОЛИГРАФИЧЕСКИЙ  
ТВОРЧЕСКИЙ ДОМ «O'QITUVCHi»  
ТАШКЕНТ— 2006

Рецензенты:

**А. НУМАНХОДЖАЕВ** — кандидат физико-математических наук;  
**Х. ИСАЕВ** — кандидат физико-математических наук;  
**М. ИСРОИЛОВ** — кандидат технических наук, доцент;  
**Ж. НУРМАТОВ** — кандидат технических наук, доцент.

Под редакцией кандидата физико-математических наук, доцента  
**А.Г.Ганиева.**

Данный учебник написан на основе учебной программы, утвержденной Министерством высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан и предназначен для учащихся академических лицеев и профессиональных колледжей. В нем освещены разделы физики: механика, молекулярная физика и основы термодинамики, основы электродинамики.

Основной целью изучения физики является объяснение фундаментальных физических законов с научной точки зрения, развитие у учащихся способности научного мировоззрения и философского рассуждения, формирование представления о физических процессах, объясняющих принцип работы используемых в технике и быту приборов и принадлежностей.

Учебник, который вы держите в руках, подготовлен на основе учебной программы для академических лицеев и профессиональных колледжей.

В начале каждой темы приводится ее краткое содержание, а в конце — вопросы для самопроверки. Думаем, что предварительное знание учащимися содержания темы увеличит у них интерес к теме. А нахождение правильных ответов на все вопросы для самопроверки может быть гарантией того, что тема полностью усвоена учащимся. Каждая тема разделена на небольшие подтемы, которые дают возможность определить предусмотренные изучением темы цели и задачи, конкретизировать ответы. Методика написания учебника может быть основой прохождения занятий по модульной системе.

Также в конце каждой главы приводятся упражнения, относящиеся к соответствующей теме и главе «Тестовые вопросы» и «Основные заключения», а в конце пособия приводятся необходимые для этого сведения.

Первая часть учебника включает в себя разделы механики, основы молекулярной физики и термодинамики, основы электродинамики (кроме оптики).

Учебник был подготовлен коллективом авторов: IV, VI, VII, XVI главы написаны А. Ганиевым и А. Авлиякуловым, I, II, V, XI главы написаны А. Ганиевым и Г. Алмардоновой, остальные главы — А. Ганиевым.

Г 1604010000—182  
353(04)-2006 бл.- заказ. — 2006

ISBN 978-9943-02-005-4

© ИПТД «O'qituvchi»,  
перевод с узб., 2006 г.

## МЕСТО ФИЗИКИ В ИЗУЧЕНИИ ПРИРОДЫ И ЕЕ ЗНАЧЕНИЕ В РАЗВИТИИ ДРУГИХ НАУК

**Физика — это наука, изучающая самые простые явления природы и вместе с тем самые общие законы, свойства материи, ее строение, законы и движение.**

Слово *физика* было взято из греческого *phuzis* — «природа», ее законы лежат в основе всех естественных наук. Поэтому ее долгое время называли философией природы. В результате увеличения экспериментального материала, его научного обоснования и совершенствования методов проверки, из философии природы выделились астрономия, химия, биология, геология и другие науки, а также физика. Поэтому граница между физикой и другими науками условна и изменяется со временем. Углубление знаний человека показывает существование еще большей взаимосвязи между этими науками. В результате этого возникли такие науки, как астрофизика, физическая химия, биофизика, геофизика. Глубокое изучение законов природы показывает, что окружающий нас мир материален и существует вне нашего сознания. Все сущее, окружающее нас и мы сами тоже являемся составной частью материи. Материя всегда находится в движении, т. е. с изменением времени взаимное расположение предметов, форма, размеры, агрегатное состояние, физические и химические свойства изменяются. **Движение — неотъемлемое свойство материи и форма ее существования.**

**Материя существует в пространстве и во времени.** Все процессы в природе продолжают в определенной последовательности и в определенное время. Если время показывает последовательность процессов в природе и ограниченную продолжительность, то пространство показывает взаимное расположение между ними. Такие свойства пространства и времени служат опорой законам сохранения, удерживающих процессы в природе в определенной форме. Все это является признаком того, что физика и философия очень глубоко связаны.

Физика является экспериментальной наукой и ее законы основываются на результатах эксперимента. Эксперимент проводится для проверки известных законов и для определения новых результатов. Теория же, опираясь на найденные результаты, формирует законы природы, объясняет известные явления и иногда предсказывает новые явления.

В зависимости от вида изучаемых объектов физика делится на ядерную физику, физику элементарных частиц, атомную и молекулярную физику, физику твердого тела, физику плазмы и др.

В зависимости от изучаемого процесса и от формы движения материи физика делится на разделы: механика материальной точки и твердого тела, механика сплошных сред, термодинамика и статистическая механика, электродинамика, теория притяжения, квантовая механика, квантовая теория поля.

Техника есть сумма всех изобретенных человечеством устройств и орудий, основанная на научных знаниях, помогающих повышать производительность труда.

Физика взаимосвязана с техникой, связь физики с техникой проявляется в двух направлениях.

**Физика возникла как результат удовлетворения потребностей людей.** В древности потребности строительства и военного дела были толчком для развития механики.

Проектирование русским инженером И. Ползуновым (1728—1766) непрерывно работающей паровой машины, изобретение английским инженером Ч. Уаттом (1736—1819) универсального парового двигателя предъявили требование искать пути повышения коэффициента полезного действия. В результате термодинамика начала развиваться ускоренными темпами. Таким образом, развитие физики оказывает влияние на технический аспект производства.

После того как реализуются открытия в физике, на арену выходят специалисты, внедряющие их в производство, и возникают новые науки, взаимосвязанные с физикой.

В конце XIX — начале XX века были открыты многие процессы, относящиеся к электромагнитным явлениям. Развитие электротехники и радиотехники способствовали открытию Л. Гальвани (1737—1789) и А. Вольтом (1745—1827) источников тока — гальванических элементов, М. Фарадеем (1791 — 1867) — явления электромагнитной индукции, А. Поповым (1857—1906) — изобретению радио, Г. Герцем (1857—1894) — доказательству существования электромагнитных волн.

Также открытия в области атомной и ядерной физики дали возможность использовать атомную энергию. В настоящее время построено большое количество атомных электростанций, работающих на атомной энергии ледоколов и подводных лодок.

Изобретение полупроводников произвело в радио- и электротехнике революционные преобразования, стало основой создания современных телевизоров, магнитофонов, компьютеров и других средств.

В результате освоения космоса и его практического применения возникла возможность приема радио- и телевизионных сигналов, передающихся с любой точки земного шара, а также появилась возможность создания беспроводных средств общения.

Создание полупроводниковых фотоэлементов дало возможность обеспечивать энергией спутники, превращать солнечную энергию в электрическую и получать экологически чистую энергию. В результате появились науки, такие как электротехника, радиотехника, ядерная техника, теплотехника, геотехника, электроника. Можно привести множество результатов физических открытий, которые облегчают жизнь людям.

### Сведения из истории развития физики

Физические процессы были в центре внимания человечества с древнейших времен, даже до нашей эры. Учение о том, что вещество состоит из атомов, было выдвинуто Демокритом, Эпикуром, Лукрецием. Учение о геоцентрической системе мира (Земля — центр мироздания) было создано Птоломеем. Также в Древней Греции до нашей эры были созданы законы рычага (опоры), прямолинейного распространения и отражения света, а также законы гидростатики Архимеда. Наблюдались простые явления, связанные с магнитными явлениями. Все они были в IV веке до нашей эры были систематизированы Аристотелем. Но надо отметить, что, по его мысли, основным средством познания был не эксперимент, а простое умозаключение. После этого долгое время не наблюдалось достойных работ, внесших вклад в развитие физики. К XVII веку знаменитый итальянский физик Г. Галилей (1564—1642) понял, что движение надо выразить при помощи математических уравнений. В отличие от Аристотеля он показал, что в результате взаимодействия одного тела с другим оно приобретает не скорость, а ускорение. Галилей открыл законы инерции и свободного падения (1604—1609), с целью определения скорости света провел опыты. Открытые английским физиком И. Ньютоном (1643—1727) три закона механики легли в основу классической механики и считаются самым большим достижением XVII века. В своем труде «Математические основы натуральной философии», изданном в 1687 году, он изложил три основных закона динамики и закон всемирного тяготения.

Следующим этапом в развитии физики было создание Ж. Максвеллом (1831—1879) в 1860—1865 годах электромагнитной теории поля. В 1857—1894 гг. Г. Герц экспериментально доказал существование электромагнитных волн.

Следующим важным событием было открытие В. Рентгеном (1846—1923) в 1895 году названных его именем лучей, а в 1896 году А. Бекерелем (1822—1908) естественной радиоактивности солей урана.

В 1905 году А. Эйнштейн (1879—1955) заявил о создании теории относительности. В этом же году он написал свое уравнение для фотоэффекта. В 1911 году Э. Резерфорд (1871—1937) и в 1913 году Н. Бор (1885—1962) создали планетарную модель атома.

Приведенные выше открытия стали основой квантовой физики. Была создана физика атомного ядра и элементарных частиц.

Следует отметить, что до создания современной физической картины мира было выдвинуто множество смелых идей и сделано много открытий. Желая углубить свои знания в области физики обязательно с ними ознакомьтесь. Теперь же остановимся на вкладе в естествознание наших предков, великих мыслителей Востока.

### Вклад мыслителей Востока в естествознание

Узбекистан является одной из стран, где была издревле развита наука и культура. Особенно большое развитие получили астрономия, математика, медицина, химия, ткачество, зодчество, фармакология, гончарное дело, философия, музыка, лингвистика, литературоведение.

Это наглядно показывают археологические раскопки и исследования, проведенные в Центральной Азии и в частности на территории Узбекистана.

Представители великих восточных мыслителей Мусо аль-Хорезми и Мухаммад аль-Фергани проводили свои исследования в Багдадской академии «Байт-ул Хикмат» («Дом мудростей»). Абу Абдуллох Мухаммад ибн Мусо аль-Хорезми (родился в 780 году в Хиве, умер в 850 году в Багдаде), написал труды по математике, астрономии, географии. Был основоположником науки алгебра («Ал-джабр») и понятия «алгоритм». Его труды «Хисоб ал-Хинд» («Индийское вычисление») и «Астрологические таблицы» уже в двенадцатом веке были переведены на латинский язык и привели к распространению в Европе десятичной системы счисления и понятия *алгоритм*.

Абдул Аббас Ахмад ибн Мухаммад ибн Кашр аль-Фергани также занимался астрономией, географией, математикой (родился в 790 году в Фергане и умер в 865 году в Багдаде). Фергани предвычислил солнечное затмение. Научно доказал, что Земля имеет форму шара, вычислил длину меридиана, изготовил прибор для измерения уровня воды на реке Нил и написал об этом научные статьи. Его энциклопедический труд «Сборник науки о звездах и о небесных движениях» был переведен на многие языки.

Еще один из великих восточных мыслителей, живший в те времена, был Абу Наср Мухаммад аль-Фараби (родился в 873 году в



**Ибн Сино**



**Мирзо Улугбек**



**Беруни**



**Фараби**



**Аль-Хорезми**

Чимкентской области, умер в 960 году в Багдаде). Написал более 160 трудов, посвященных различным областям науки. В XI веке в столице Хорезма Ургенче была организована академия Маъмуна «Дом знаний», где обсуждались вопросы математики и медицины. Членами этой академии были великие мыслители Абу Али ибн Сина, Абу Райхан Беруни, Абу Сахл Масуди и др.

Ученый-энциклопедист и мыслитель Абу Райхан Мухаммад ибн Ахмад аль-Беруни (родился в 973 году в Хорезме, умер 1048 году в Газне) сделал первый глобус. Он написал более 150 книг и статей. Сво-

ими мыслями о геоцентрической системе внес большой вклад в развитие науки.

Абу Али ибн Сина — ученый-энциклопедист, мыслитель, философ, поэт (родился в деревне Афшона близ Бухары, умер в 1037 году в Исфагане). Имеет более 280 трудов. Из них более 40 посвящены медицине, более 30 — естественным наукам и музыке, остальные — философии, логике, этике, богословию, общественно-политической тематике.

В XV веке Мирзо Улугбек в Самарканде организовал академию. При академии была хорошо оснащенная обсерватория, богатая библиотека и высшее учебное заведение — медресе.

Мухаммад Тарагай Улугбек (родился в 1394 году в Султании, был убит в 1449 году) основал самую крупную в мире астроно-

мическую школу. Оставил большое научное и культурное наследие. Одной из них является «Таблица Улугбека» («Зичи Курагоний»). Вместе с учениками составил таблицу более чем тысячи звезд.

Знаменитый астроном и ученый математик Насреддин Туей (Абу Шараф Мухаммад ибн Мухаммад ибн Хасан 1201—1274) внес большой вклад в развитие астрономии и математики. Его книги «Axloqī Nasriy» и «Tajrid», а также множество трудов, посвящены минерологии, медицине, физике, логике, философии и другим областям науки.

Математик и астроном Козизода Руми (Салохиддин Мусо ибн Мухаммад 1360—1437) был учителем Улугбека. Руми имел прозвище «Aflotuni Zamon» — Платон своего времени. Известный математик и астроном аль-Каши (Гияс-ад-Дин Джамшид аль-Каши умер около 1430 года) первым ввел в математику десятичные дроби и теоретически их обосновал, вычислил значение  $\sin \Gamma$  и  $\pi$  в десятичной системе с точностью до 17 знаков.

Знаменитый астроном Али Кушчи (Мовлоно Алауддин Али ибн Мухаммад Кушчи, 1403—1474) написал труды, посвященные математике и астрономии. Он с научной точки зрения правильно объяснил смену времен года и затмения Луны и Солнца.

Работы и открытия великих мыслителей, имена которых мы упоминаем в области естественных наук: математике, медицине, философии, языкознании, внесли большой вклад в развитие мировой науки, а в некоторых областях наук привело к поднятию их на новую ступень развития и к появлению новых направлений. Последующие поколения, которые с уважением относятся к своим славным предкам, являются достойными продолжателями их дела. Наглядным примером этому могут быть работы, проводимые в Узбекистане по развитию физики.

## Работы, проводимые в Узбекистане по развитию физики

После обретения Узбекистаном независимости особое внимание уделяется развитию науки. В настоящее время в Академии наук Узбекистана имеется восемь отделений по следующим научным направлениям. Одно из них — физико-математическое отделение. В его состав входят следующие научно-исследовательские институты, которые работают в области развития физики: Институт ядерной физики, научно-производственное объединение «Физика Солнца», Институт электроники, Институт астрономии, отделение теплофизики. В настоящее время в Узбекистане проводятся научно-исследовательские работы по следующим направлениям физики.

**Теплофизика.** Исследования в области этого направления физики проводятся в научной школе, созданной академиком П.К. Хабибуллаевым, его основу составляет отдел теплофизики Академии наук Узбекистана. Научные работы проводятся по направлениям: теплофизика неоднородных сред, взаимодействие лазерного излучения с веществом, высокотемпературная сверхпроводимость.

**Ядерная физика.** Работы в этой области в Узбекистане проводятся с 20-х годов прошлого столетия. Но регулярно исследования начались проводиться в Физико-техническом институте под руководством академика С.А. Азимова (1914—1988). В 1956 году был организован Институт ядерной физики. Сейчас здесь проводятся научно-исследовательские работы по направлениям: ядерная спектроскопия и строение ядра, ядерные реакции, квантовая теория поля, физика элементарных частиц, релятивистская ядерная физика и другие.

**Физика и техника Солнца (гелиотехника).** Основная задача этого направления — разработка физических основ превращения солнечной энергии в тепловую, что позволит создать высокоэффективные солнечные установки. В развитии этой отрасли большая заслуга члена-корреспондента Академии наук Г. Умарова (1921—1988). В настоящее время в народном хозяйстве широко используются солнечные отопители, обеспечивающие дома горячей водой и теплом, сушильные установки, установки по опреснению соленой воды и другие приспособления, работающие на основе солнечной энергии.

**Физика тугоплавких материалов.** Исследования по высокотемпературному материаловедению проводились С. Азимовым и другими учеными начиная с 1976 года. За основу этих исследований был принят метод термической обработки материалов концентри-



**У. Орифов**  
(1909 — 1976)



**С.А. Азимов**  
(1914 — 1988)



**П. Хабибуллаев**  
(род. в 1936 г.)

рованным солнечным лучом. Для этой цели в 1987 году в Паркентском районе Ташкентской области был построен солнечный концентратор мощностью 1000 кВт. Такая установка до этого времени имела только в городе Одейно (Франция). Фокусное расстояние установки равно 18 м, его размеры 54x42 м и состоит из 62 одинаковых гелиостатов.

В 1993 году в составе научно-производственного объединения «Физика Солнца» был организован Научно-исследовательский институт материаловедения.

**Физика высоких энергий.** Работы в этой области начались под руководством академика С. Азимова в Физико-техническом институте. Исследования в основном проводятся по двум направлениям: физика космических лучей и изучение взаимодействия частиц и ядер сверхвысоких энергий с нуклонами и ядрами.

**Физическая электроника.** Первые исследования в этой области в Узбекистане начались в тридцатых годах прошлого столетия. Дальнейшее развитие этой области и возникновение научной школы физиков-электронщиков в большой мере связано с именем академика У. Орифова (1909—1976). В 1967 году был организован Институт электроники Академии наук. В настоящее время работы в этой области направлены на поверхностную диагностику и разработку основ методики изменения физико-химических свойств поверхности твердого тела в заданном направлении, а также получение полупроводниковых и конструкционных материалов и создание современных ионно-лучевых технологий для их обработки.

**Физика полупроводников.** Научно-исследовательские работы в этой области начались в 30-х годах XX столетия. Эти работы во множестве проводятся в научно-исследовательских институтах и в высших учебных заведениях. В области физи-



**Механическим движением** называется изменение положения тел или частей тел относительно друг друга.

Раздел физики, изучающий законы механического движения, а также причины, вызывающие эти движения и изменяющие их, называется **механикой**.

Механика, в зависимости от размеров и скорости изучающих тел, делится на классическую, релятивистскую и квантовую механику.

### Классическая механика

Изучает законы движения макротел, скорости которых во много раз меньше скорости света в вакууме. Основные законы классической механики были определены итальянским физиком *Г. Галилеем*, а английским ученым *И. Ньютоном* доведены до совершенства.

### Релятивистская механика

Изучает законы движения тел, двигающихся со скоростями, близкими к скорости света в вакууме. Релятивистская механика создана на основе специальной теории относительности *А. Эйнштейна*.

### Квантовая механика

В квантовой механике изучаются законы движения микротел (атомов и элементарных частиц).

Механика подразделяется на три раздела:

1. Кинематика.
2. Динамика.
3. Статика.

Кинематика изучает движение тел, не рассматривая те причины, которые это движение обуславливают.

Динамика изучает законы движения тел и те причины, которые вызывают или изменяют это движение.

Статика изучает законы равновесия системы тел, и в физике рассматривается вместе с законами динамики.



Раздел механики, в котором изучаются законы движения тел, не рассматривая те причины, которые это движение обуславливают, называется **кинематикой**. Основной задачей кинематики является определение величин, характеризующих движение и представленных при помощи формул, графиков, таблиц.



**Содержание:** понятие о материальной точке и абсолютно твердом теле; система отсчета; кинематическая формула материальной точки.

**Изучение методом сравнения.** Следует особо отметить то, что самая высокая интеллектуальная способность человека — это изучение при помощи сравнения. Другими словами, движение изучаемого тела изучается при помощи сравнения с движением тела, выбранного в качестве физической модели и движение которого более простое.

В качестве самой простой модели используется понятием материальной точки.

**Материальная точка.** Материальной точкой называется тело известной массы, размерами которой в данных условиях можно пренебречь. Понятие материальной точки относительно. Она непосредственно зависит от изучаемой задачи. Например, при изучении орбитального движения планет вокруг Солнца их можно рассматривать в качестве материальной точки. Также в качестве материальной точки можно рассматривать и гигантский искусственный спутник Земли, вращающийся вокруг земного шара.

**Абсолютно твердое тело.** Еще одним очень часто используемым в механике понятием является понятие абсолютно твердого тела. Абсолютно твердым называется тело, недеформируемое при любых состояниях, другими словами, тело, у которого расстояние между двумя любыми точками остается постоянным при любой действующей силе.

**Поступательное движение.** Любое движение можно рассматривать как сумму поступательных и вращательных движений.

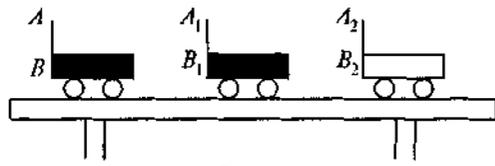


Рис. 1



Рис. 2

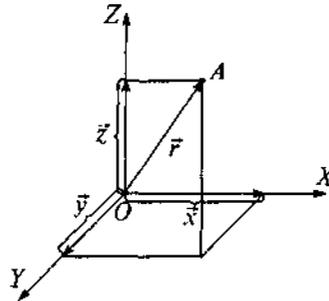


Рис. 3

Если прямая линия, прикрепленная к любой точке твердого тела при движении остается параллельной самой себе, то такое движение называется поступательным. В качестве примера рассмотрим тележку, движущуюся на столе. Во всех трех положениях прямые линии  $AB$ ,  $A_1B_1$  и  $A_2B_2$ , проходящие через конечную точку тележки, взаимно параллельны (рис. 1).

Следует отметить,

что когда тело совершает поступательное движение, все точки двигаются одинаково и оставляют параллельные следы.

**Вращательное движение.** Если все точки твердого тела двигаются по окружности вокруг известной оси, названной осью вращения, то такое движение называется **вращательным**. Примером этому может служить детская игрушка волчок. Если на поверхности игрушки нарисовать точки разных цветов, то в процессе вращения эти точки будут казаться цветными окружностями (рис. 2).

**Система отсчета.** Как было сказано выше, механическое движение показывает изменение положения тела относительно других тел. Значит, началом отсчета можно считать тело, относительно которого изучается состояние тела. Движение поезда определяется изменением его положения относительно вокзала, движение футбольного мяча — относительно футболиста. Для полного отображения механического движения необходимо ввести систему отсчета, показывающую его состояние в пространстве и времени. Такую задачу можно выполнить с помощью известной из геометрии **декартовой системы координат**.

Местоположение любой материальной точки в пространстве определяется тремя координатами  $(X, Y, Z)$ . Если движение рассматривается на плоскости, то можно ограничиться двумя координатами  $(X, Y)$ , если на прямой линии — то одной координатой  $(X)$ . Вектора  $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$ ,  $\vec{z}$  называются составляющими  $\vec{r}$ -вектора, или его проекциями на координатные оси (рис. 3):

$$\vec{r} = \vec{x} + \vec{y} + \vec{z}.$$

**Движение материальной точки.** Если материальная точка  $A$  движется в системе отсчета, то ее координаты  $(X, Y, Z)$  с течением времени изменяются. Это изменение в математической форме можно выразить следующим образом:

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

или в векторной форме  $\vec{r} = \vec{r}(t)$ . (1.2)

Это уравнение, показывающее изменение состояния материальной точки с течением времени, называется **кинематическим уравнением движения материальной точки**.



### Вопросы для самопроверки

1. Какое движение называется механическим? Приведите три примера механического движения.
2. Что изучает механика?
3. Что изучает классическая механика?
4. Что изучает релятивистская механика?
5. Что изучает квантовая механика?
6. Что изучает кинематика?
7. Что изучает динамика?
8. Что изучает статика?
9. В чем заключается значение изучения методом сравнения?
10. Что называют материальной точкой?
11. Какие виды движения знаете?
12. Какое движение называют поступательным движением? Приведите примеры.
13. Какое движение называют вращательным движением? Приведите примеры.
14. Почему вводится понятие системы отсчета?
15. Как определяется место материальной точки в системе отсчета?
16. Приведите кинематическое уравнение движения материальной точки.

## § 2. Векторные величины. Действия над векторами

**Содержание:** векторные величины; изображение векторов; алгебраические действия над векторами; скалярное и векторное умножение двух векторов.

**Физические величины.** В физике в основном применяются два типа величин. Один из них полностью определяется своим числовым значением, и называется скалярной величиной, или скаляром. К таким величинам относятся площадь, объем, плотность, масса, количество теплоты, количество энергии и др.

Для полного определения величин, кроме их числового значения, надо указать также и направление. Такие величины на-

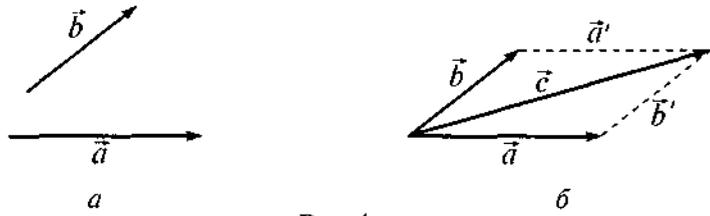


Рис. 4



Рис. 5

зываются *векторными величинами*, или векторами. Векторные величины — это *перемещение, ускорение, сила, момент силы*.

**Изображение векторов.** Графически вектор изображают стрелкой, в написании вектор обозначается со стрелкой над ним ( $\vec{r}$ ). Числовое значение вектора называется *модулем* вектора, или *длиной* и обозначается как  $r$  или  $|\vec{r}|$ . Два вектора равны, если совпадают их модули и направления. Вектор, у которого длина равна единице, называется *единичным вектором* и обозначается  $\vec{r}_0$ :  $\vec{r} = r \cdot \vec{r}_0$ .

Вектора, у которых начальная точка лежит на плоскости или в любой точке пространства, называются *свободными векторами*. Мы будем иметь дело со свободными векторами, т.е. будем перемещать векторы в нужную нам точку. Это облегчает выполнение над ними действий.

**Сложение векторов.** Суммой двух векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  называется вектор, равный диагонали параллелограмма, сторонами которого являются эти векторы (рис. 4):

$$\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}.$$

Здесь векторы  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  перенесены в точку  $O$ , и при помощи параллельных векторов  $\vec{a}'$  и  $\vec{b}'$  был построен параллелограмм. Из рисунка 4 видно, чтобы сложить векторы  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ , нужно начало вектора  $\vec{b}$  перенести в конец вектора  $\vec{a}$  и соединить начало вектора  $\vec{a}$  с концом вектора  $\vec{b}$ . Именно так поступают при сложении нескольких векторов (рис. 5):

$$\vec{d} = \vec{a} + \vec{b} + \vec{c}.$$

Когда говорят *алгебраическая сумма*, имеется в виду сложение числовых значений величин, а когда говорят *геометрическая сумма*, имеется в виду сложение числовых значений с учетом направления вектора.

**Вычитание векторов.** Вычитание вектора  $\vec{b}$  из вектора  $\vec{a}$  равносильно сложению вектора  $\vec{a}$  с вектором  $(-\vec{b})$ :

$$\vec{c} = \vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b}).$$

**Произведение и деление вектора на число.** Произведение вектора на какое-то число  $m$  — это изменение его модуля в  $m$  раз:

$$\vec{c} = m\vec{a} = m\vec{a}_0 = (ma)\vec{a}_0.$$

Деление вектора на  $n$  равнозначно умножению вектора на  $1/n$ , т. е.

$$\vec{d} = \frac{\vec{a}}{n} = \frac{1}{n}\vec{a}.$$

**Скалярное произведение двух векторов.** Скалярным произведением векторов называют скаляр, равный произведению модулей этих векторов на косинус угла между ними (рис. 6):

$$(\vec{a} \cdot \vec{b}) = a \cdot b \cdot \cos \alpha.$$

Если  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , то  $\cos \alpha = 0$  и  $(\vec{a} \cdot \vec{b}) = a \cdot b \cdot \cos \pi/2 = 0$ . Значит, скалярное произведение двух взаимно перпендикулярных векторов равно нулю.

**Векторное произведение двух векторов.** Векторным произведением двух векторов  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  называют такой вектор  $\vec{c}$ , который перпендикулярен векторам  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ , а модуль его равен площади параллелограмма, построенного на векторах  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ , направление вектора  $\vec{c}$  совпадает с поступательным движением острия буравчика, направление движения ручки буравчика совпадает с направлением перехода от вектора  $\vec{a}$  к вектору  $\vec{b}$ :  $\vec{c} = [\vec{a} \cdot \vec{b}]$  (рис. 7). Модуль вектора  $\vec{c}$  равен  $c = a \cdot b \cdot \sin \varphi$ .

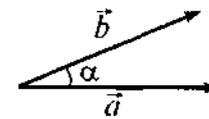


Рис. 6

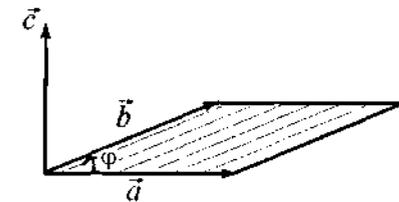


Рис. 7



### Вопросы для самопроверки

1. Какие величины называют скалярными величинами? Приведите примеры. 2. Какие величины называют векторными величинами? Приведите примеры. 3. Как складываются два вектора? 4. Как складываются 3 и более векторов? 5. Как производится вычитание векторов? 6. Как производится умножение вектора на число? 7. Как производится скалярное умножение двух векторов? 8. Какой величиной будет скалярное умножение двух векторов? 9. Как производится векторное умножение двух векторов? 10. Какой величиной будет векторное умножение двух векторов?



### § 3. Перемещение и путь

Содержание: траектория движения материальной точки. Перемещение и путь.

**Величины, характеризующие движение материальной точки.** Одной из величин, характеризующих движение материальной точки, является траектория движения. Траекторией движения материальной точки называют линию, которую описывает в пространстве движущаяся материальная точка. В зависимости от формы траектории движение может быть прямолинейным или криволинейным. На рисунке 8 приведена траектория движения материальной точки.

**Траектория и путь.** Движение материальной точки начнем наблюдать из точки  $A$ . Пусть через определенное время она будет в точке  $B$ . Скалярная величина  $\Delta s$ , равная длине участка траектории  $AB$ , называется длиной пути. Другими словами, путь, пройденный материальной точкой за время  $\Delta t$ , равен длине траектории описанной материальной точкой за это время.

**Перемещение и путь.** Перемещением называется вектор  $\Delta \vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0$ , соединяющий начальное положение материальной точки с его последующим положением.

В прямолинейном движении вектор перемещения совпадает с соответствующим участком траектории и модуль вектора перемещения  $|\Delta \vec{r}|$  будет равен пройденному пути  $\Delta s$ .

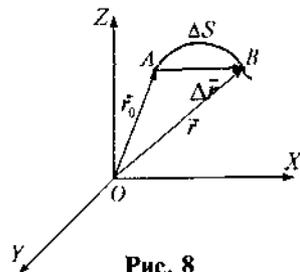


Рис. 8



### Вопросы для самопроверки

1. Что называют траекторией движения материальной точки? 2. Что называют путем? 3. Связаны ли друг с другом траектория и путь? 4. Что называют перемещением? 5. Когда модуль вектора перемещения будет равен пути?



### § 4. Прямолинейное равномерное движение. Скорость

Содержание: вектор средней скорости, мгновенная скорость; скорость в равномерном и неравномерном движении; сложение скоростей.

**Скорость.** В повседневной жизни мы часто встречаемся с понятиями «быстрее» или «медленнее». Например, применяются выражения «самолет движется быстрее поезда, легковой автомобиль — автобуса, велосипедист — пешехода». Здесь подразумевается, что средство, движущееся быстрее, за равный промежуток времени перемещается на большее расстояние.

Для сравнения перемещения (или пройденного пути) движущегося тела в единицу времени вводится понятие скорости.

**Вектор скорости.** Таким образом, скорость — это величина, зависящая от перемещения движущегося тела и времени, потраченного на это перемещение. Скорость — это векторная величина, показывающая не только скорость движения, но также и направление движения.

Вектором средней скорости  $\vec{v}_{cp}$  называется величина, определяемая отношением вектора перемещения материальной точки  $\Delta \vec{r}$  ко времени  $\Delta t$ , в течение которого это перемещение совершилось:

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}. \quad (4.1)$$

**Мгновенная скорость.** Теперь найдем скорость тела в точке  $A$ . Для этого будем уменьшать промежуток времени движения  $\Delta t$ , т. е.  $\Delta t \rightarrow 0$  (рис. 9).

При бесконечном уменьшении  $\Delta t$  средняя скорость будет стремиться к мгновенной скорости  $\vec{v}_{cp}$ . Значит, согласно (4.1):

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}. \quad (4.2)$$

Таким образом, мгновенная скорость определяется как первая производная от радиуса-вектора движущейся материальной точки по времени. Модуль мгновенной скорости определяется как первая производная пути по времени:

$$v = \frac{ds}{dt}. \quad (4.3)$$

**Скорость в равномерном движении.** Равномерным движением материальной точки называют такое движение, при котором за равные промежутки времени совершаются оди-

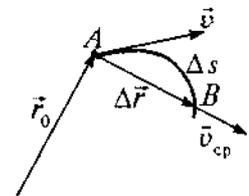


Рис. 9

наковые перемещения. Значит, на любом участке пути значение мгновенной скорости будет одинаковым и определяется отношением пройденного пути  $\Delta s$  к затраченному времени  $\Delta t$ :

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

В этом случае пройденный путь определяется выражением

$$\Delta s = v \cdot \Delta t. \quad (4.4)$$

**Скорость в неравномерном движении.** В этом случае материальная точка проходит за равные промежутки времени разные пути. При этом изменяется не только значение мгновенной скорости, но меняется и ее направление. В этом случае можно вводить понятие средней скорости при неравномерном движении. Она определяется следующим образом:

$$v_{\text{ср}} = \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

Спидометр автомобиля показывает модуль (значение) мгновенной скорости. Путь же определяется выражением

$$\Delta s = v_{\text{ср}} \cdot \Delta t. \quad (4.5)$$

**Сложение скоростей.** Теперь рассмотрим скорость движения человека, находящегося в движущемся поезде, относительно перрона. Пусть скорость человека задана относительно поезда  $\vec{v}_0$ , а скорость поезда относительно перрона  $\vec{v}_n$ . Тогда как определяется скорость человека относительно перрона? Если принять во внимание, что скорость есть векторная величина, то она будет равна векторной сумме скоростей человека относительно поезда и поезда относительно перрона:

$$\vec{v} = \vec{v}_n + \vec{v}_0.$$

Эта формула выражает закон сложения скоростей.

**Единица скорости в СИ.** Чтобы найти единицу скорости в СИ на основании определения скорости, воспользуемся единицами пути (расстояния), пройденного материальной точкой и времени в СИ:

$$[v] = \frac{[s]}{[t]} = \frac{1 \text{ м}}{1 \text{ с}} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Таким образом, в СИ за единицу скорости принимают скорость движения, при которой материальная точка за 1 секунду проходит 1 м пути.



## Вопросы для самопроверки

1. С какой целью вводится понятие скорости? 2. Скорость — векторная величина или скалярная? 3. Как определяется вектор средней скорости? 4. Как определяется мгновенная скорость? 5. Как определяется скорость при равномерном движении? 6. Как определяется скорость при неравномерном движении? 7. В чем заключается закон сложения скоростей? 8. Как найти единицу скорости в СИ? 9. Какую скорость показывает спидометр автомобиля?



## § 5 Ускорение и его составляющие

**Содержание:** вектор среднего ускорения; мгновенное ускорение; составляющие ускорения.

**Ускорение.** В повседневной жизни мы часто наблюдаем изменение скорости. Например, сравним через определенное время скорости автобуса и легкового автомобиля, одновременно в одном направлении начавших движение от остановки. Естественно, показания спидометра легкового автомобиля будут больше. Значит, изменение скорости двух транспортных средств различное, для их сравнения возникает необходимость ввести некоторую величину, характеризующую быстроту изменения скорости. Эта величина — ускорение.

**Среднее и мгновенное ускорение.** Ускорение — это физическая величина, характеризующая быстроту изменения скорости по модулю и направлению. Среднее ускорение  $\bar{a}_{\text{ср}}$  неравномерного движения за время  $\Delta t$  есть векторная величина, которая определяется отношением изменения скорости  $\Delta \vec{v}$  к  $\Delta t$ :

$$\bar{a}_{\text{ср}} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

Если будем бесконечно уменьшать  $\Delta t$ , т.е.  $\Delta t \rightarrow 0$ , то найдем мгновенное ускорение материальной точки за время  $t$ :

$$\bar{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Таким образом, ускорение — есть векторная величина, равная первой производной скорости по времени.

**Единица ускорения в СИ.** Из определения ускорения ее единица определяется следующим образом:

$$[a] = \frac{[v]}{[t]} = \frac{1 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1 \text{ с}} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

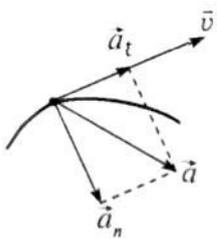


Рис. 10

Таким образом, в СИ в качестве единицы ускорения принято ускорение движения, при котором тело изменяет свою скорость за 1 с на 1 м/с.

**Составляющие ускорения.** Как было отмечено в определении, ускорение характеризуется изменением направления скорости и ее модуля (величины). Значит, полное ускорение ( $\vec{a}$ ) тела есть геометрическая сумма составляющих, быстроты изменения скорости по модулю ( $\vec{a}_t$ ) и быстроты изменения скорости по направлению ( $\vec{a}_n$ ) (рис.10), т. е.

$$\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n.$$

Если теперь к треугольнику, изображенному на рисунке 10, применим теорему Пифагора, получим выражение для значения ускорения  $a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}$ . Здесь  $\vec{a}_t$  — тангенциальное,  $\vec{a}_n$  — нормальное составляющее ускорения.

**Тангенциальное составляющее ускорения.** Тангенциальное составляющее ускорения  $a_t$  определяется как первая производная от скорости по времени. Оно всегда направлено по касательной к траектории движения и характеризует изменение модуля скорости:

$$a_t = \frac{dv}{dt}.$$

**Нормальное составляющее ускорения.** Нормальное составляющее ускорения определяется как

$$a_n = \frac{v^2}{r}.$$

Оно всегда направлено к центру кривизны траектории. Поэтому оно называется центростремительным ускорением.  $a_n$  характеризует изменение направления скорости.

**Какое это движение, если  $a_t = 0$ ?**

Здесь может быть два случая:

1)  $a_t = 0$ ,  $a_n = 0$ , значит,  $a = 0$  — прямолинейное равномерное движение;

2)  $a_t = 0$ ;  $a_n \neq 0$ , значит,  $a = a_n$ , — криволинейное равномерное движение.

В частности, при  $a_n = \text{const}$  — равномерное движение по окружности.

**Какое это движение, если  $a_n = 0$ ?**

1)  $a_n = 0$ ;  $a_t = 0$  этот случай уже рассмотрен выше.

2)  $a_n = 0$ ;  $a_t \neq 0$  — показывает прямолинейное неравномерное (с переменным ускорением) движение.

В частности, при  $a_n = 0$ ,  $\vec{a}_t = \vec{a} = \text{const}$  — прямолинейное равнопеременное движение.

Этот случай часто встречается в повседневной жизни.



## Вопросы для самопроверки

1. С какой целью вводится понятие «ускорение»?
2. Ускорение векторная или скалярная величина?
3. Как определяется вектор среднего ускорения?
4. Как определяется мгновенное ускорение?
5. Какие бывают составляющие ускорения? Дайте им определения.
6. Что характеризует изменение модуля ускорения? А направление?
7.  $a_t = 0$ ;  $a_n = 0$  — это какое движение?
8. А  $a_t = 0$ ;  $a_n \neq 0$ ?
9. А  $a_t \neq 0$ ;  $a_n = 0$ ?
10. Как определяется единица ускорения в СИ?



## § 6. Формула скорости и пути в прямолинейном равнопеременном движении. Графическое изображение движения

**Содержание:** прямолинейное равнопеременное движение; график скорости; формула пути; график пути; свободное падение; ускорение свободного падения.

**Прямолинейное равнопеременное движение.** Прямолинейным равнопеременным движением называется движение, при котором тангенциальное составляющее ускорение остается постоянным, т. е.

$$a_t = a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \text{const} \quad (6.1)$$

При этом скорость тела, движущегося прямолинейно, изменяется на равные значения за равные промежутки времени:

$\Delta v$  — изменение скорости за время  $\Delta t$ , т. е.  $\Delta v = v_t - v_0$ , где  $v_0$  — начальная скорость,  $v_t$  — скорость, приобретенная телом по истечении времени  $\Delta t$ . Пусть  $v_t = v$ . А также для простоты возьмем  $\Delta t = t$ , предыдущая формула примет следующий вид:

$$a = \frac{v_t - v_0}{t} \quad (6.2)$$

из этой формулы найдем конечную скорость:

$$v = v_0 + at \quad (6.3)$$

Если движение является ускоренным, то  $a$  берется с положительным знаком, если замедленным — с отрицательным.

При прямолинейном равнопеременном движении средняя скорость может быть найдена как полусумма начальной  $v_0$  и конечной  $v_t$  скоростей:

$$v_{\text{ср}} = \frac{v + v_0}{2}.$$

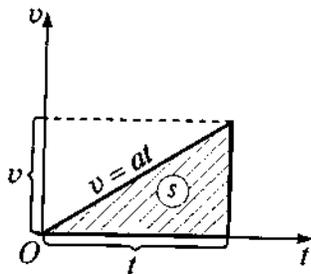


Рис. 11

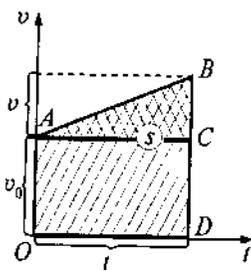


Рис. 12

**График скорости.** Для того чтобы построить график зависимости скорости при прямолинейном равнопеременном движении от времени, откладываем по оси ординат значение скорости, а по оси абсцисс — время. На рисунке 11 приводится график скорости движения, когда начальная скорость равна нулю. При  $v_0 = 0$  формула (6.3) принимает следующий вид:

$$v = at.$$

Если начальная скорость отлична от нуля, то график скорости принимает вид, приведенный на рисунке 12. Следует отметить, что численное значение площади под графиком скорости показывает величину пройденного пути.

**Формула пути.** Найдем формулу пути при прямолинейном равнопеременном движении. На рисунке 11 штрихованная поверхность определяет путь, пройденный телом со скоростью  $v$  за время  $t$ . Из формулы нахождения площади треугольника

$$s = \frac{1}{2} v \cdot t = \frac{1}{2} at^2. \quad (6.5)$$

Теперь подсчитаем путь, когда начальная скорость отлична от нуля (рис. 12). Путь равен площади трапеции  $OABD$ . Эта площадь в свою очередь равна сумме площадей прямоугольника  $OACD$  и треугольника  $ABC$ , т. е.

$$s = s_0 + s_2 = v_0 t + \frac{1}{2} at^2.$$

Значит, 
$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (6.6)$$

Это выражение называется формулой пути при равнопеременном движении.

**График пути.** Для построения графика пути откладываем по оси ординаты путь  $s$ , а по оси абсцисс — время  $t$ .

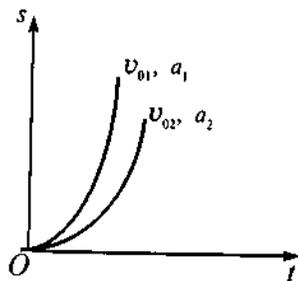


Рис. 13

Формула пути (6.6) — квадратичная относительно  $t$  (присутствует вторая степень  $t$ ). Из математики известно, что график квадратичного уравнения — это парабола. Мы рассмотрим случай, когда  $t \geq 0$ . Из рисунка 13 видно, что график пути при прямолинейном равнопеременном движении состоит из семейства парабол. Они отличаются значениями  $v_0$  и  $a$ .

**Примеры прямолинейного равнопеременного движения из природы.** Простым примером прямолинейного движения может быть свободное падение тела и движение тела, брошенного вертикально вверх.

При помощи множества опытов итальянский ученый Г. Галилей изучал это движение и удостоверился, что это равнопеременное движение.

Из опыта он определил, что тела движутся вертикально к центру Земли с постоянным по величине ускорением  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ . Это ускорение называется ускорением свободного падения.

**Свободное падение.** Свободным падением называется движение, происходящее только под действием силы тяжести.

**Ускорение свободного падения.** Одинаково ли для всех тел ускорение свободного падения? Ускорение свободного падения одинаково для всех тел. Для поля притяжения Земли оно равно  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ . Однако следует отметить, что Земля не является идеальным шаром, поэтому значение  $g$  меняется от  $g = 9,780 \text{ м/с}^2$  (на экваторе) до  $g = 9,832 \text{ м/с}^2$  (на полюсах). Но в расчетах принято брать его значение равным  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .



Г. Галилей  
(1564 — 1642)



### Вопросы для самопроверки

1. Какое движение называется прямолинейным равнопеременным?
2. Напишите формулы скорости и пути при прямолинейном равнопеременном движении.
3. Начертите графики скорости и пути при прямолинейном равнопеременном движении.
4. Приведите примеры прямолинейного равнопеременного движения.
5. Какое движение называют свободным падением?
6. Какова величина ускорения свободного падения?



**Содержание:** угловая скорость и угловое ускорение; связь между величинами, характеризующими прямолинейное и криволинейное движение; частота вращения и период.

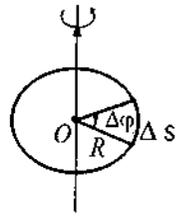


Рис. 14

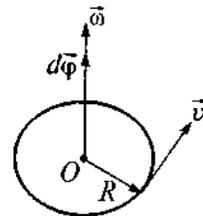


Рис. 15

Как было сказано выше, любое движение можно рассматривать как сумму поступательного криволинейного движения. Мы подробно ознакомились с поступательным движением. Теперь рассмотрим криволинейное движение. Величины, характеризующие эти движения, должны быть похожи друг на друга.

**Угловая скорость.** Рассмотрим движение материальной точки по окружности радиуса  $R$  (рис.14). В процессе движения материальной точки по окружности она повторно проходит через определенную точку. Значит, такие величины, как перемещение и путь не могут быть основными величинами, характеризующими движение по окружности. Роль этой величины может выполнить угол поворота  $\Delta\varphi$  за время  $\Delta t$ . Очень маленький угол поворота можно рассматривать в качестве вектора. Такие векторы, у которых направление зависит от направления вращения, называются *псевдовекторами* или аксиальными векторами. Модуль  $\Delta\vec{\varphi}$  вектора такой же, как у угла поворота, а направление совпадает с направлением поступательного движения острия буравчика, у которого вращательное движение ручки совпадает с направлением движения материальной точки. Значит, величина, похожая на  $\Delta\vec{r}$  в поступательном движении, во вращательном движении будет углом вращения  $\Delta\vec{\varphi}$ , а величина, похожая на путь  $\Delta s$ , будет  $\Delta\varphi$ . Тогда угловая скорость — это векторная величина, равная первой производной угла поворота материальной точки по времени:

$$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}. \quad (7.1)$$

Направление  $\vec{\omega}$  совпадает с направлением  $d\vec{\varphi}$ . Среднее значение угловой скорости определяется выражением

$$\omega_{cp} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}. \quad (7.2)$$

И при равномерном движении по окружности угловая скорость определяется этим выражением.

**Единица угловой скорости.** Единица угловой скорости в СИ определяется следующим образом:

$$[\omega] = \frac{[\varphi]}{[t]} = 1 \frac{\text{рад}}{\text{с}} = 1 \frac{1}{\text{с}} = 1 \text{с}^{-1}.$$

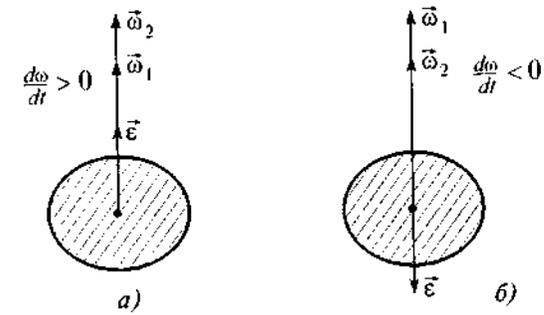


Рис. 16

Здесь принято во внимание то, что во многих случаях вместо радиана ставится единица.

Таким образом, в СИ в качестве единицы угловой скорости принята угловая скорость вращательного движения материальной точки при повороте на 1 радиан за 1 секунду.

С целью определения связи между линейной и угловой скоростью из рисунка 14 определим  $\Delta s$ . Из курса математики известно, что длина дуги  $\Delta s$  равна произведению угла поворота  $\Delta\varphi$  и радиуса  $R$ , т. е.

$$\Delta s = R \cdot \Delta\varphi. \quad (7.3)$$

Тогда согласно определению линейной скорости

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R\Delta\varphi}{\Delta t} = R \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = R \frac{d\varphi}{dt} = R\omega.$$

**Угловое ускорение.** Угловым ускорением называется векторная величина, равная первой производной угловой скорости по времени:

$$\vec{\epsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}.$$

Вектор углового ускорения направлен по оси вращения в сторону вектора угловой скорости. При ускоренном движении направление вектора  $\vec{\epsilon}$  параллелен вектору  $\vec{\omega}$ , а при замедленном — антипараллелен (рис.16).

Среднее значение углового ускорения находится с помощью выражения

$$\epsilon_{cp} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\Delta t}.$$

Тангенциальное составляющее ускорения  $a_\tau$  определим, пользуясь связью между линейным  $v$  и угловым  $\omega$  скоростями  $v = R\omega$ . Здесь радиус окружности  $R$  — постоянная величина:

$$a_\tau = \frac{dv}{dt} = \frac{d(\omega R)}{dt} = R \frac{d\omega}{dt} = R\epsilon. \quad (7.4)$$

Нормальная составляющая ускорения

$$a_n = \frac{v^2}{R} = \frac{(R\omega)^2}{R} = \frac{R^2\omega^2}{R} = \omega^2 R. \quad (7.5)$$

**Связь между характеристиками прямолинейного и криволинейного движения.** Связь между путем  $s$  в прямолинейном движении и углом поворота  $\varphi$  при криволинейном движении:

$$s = R\varphi;$$

связь между линейной скоростью  $v$  и угловой скоростью  $\omega$ :

$$v = R\omega.$$

Выражения для тангенциального и нормального ускорения:

$$a_\tau = R \cdot \epsilon, \quad (7.6)$$

$$a_n = \omega^2 \cdot R. \quad (7.7)$$

Выражения при равнопеременном движении материальной точки по окружности

$$\omega = \omega_0 + \epsilon t;$$

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

где  $\omega_0$  — начальная угловая скорость, угловое ускорение  $\epsilon$  в зависимости от направления движения может принимать положительное или отрицательное значение.

**Период и частота вращения.** Если  $\omega = \text{const}$ , то такое движение называется *равнопеременным движением по окружности*. Оно может характеризоваться периодом вращения. Периодом вращения  $T$  называется время, в течение которого тело делает один полный оборот или поворачивается на угол  $2\pi$ .

Значит, при  $\Delta t = T$ ,  $\Delta\varphi = 2\pi$ . Тогда

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{или} \quad T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (7.8)$$

Число полных вращений материальной точки в единицу времени называется частотой вращения —  $n$ . Значит, частота вращения и период вращения взаимно обратимые величины:

$$n = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{или} \quad \omega = 2\pi n. \quad (7.9)$$

**Единица углового ускорения.** Согласно определению углового ускорения

$$[\epsilon] = \frac{[\omega]}{[t]} = \frac{1\text{с}^{-1}}{1\text{с}} = 1\text{с}^{-2}.$$

Единицы периода и частоты вращения соответственно будут  $[T] = [t] = 1\text{с}$ ;  $[n] = \frac{1}{[T]} = 1\text{с}^{-1}$ .



### Вопросы для самопроверки

1. Как определяется скорость? 2. Напишите единицу угловой скорости в СИ. 3. Как определяется угловое ускорение и его направление? 4. Как определяется единица углового ускорения в СИ? 5. Какой вид связи между величинами, характеризующими прямолинейное и криволинейное движение? 6. Какое движение называется равномерным движением по окружности? 7. Что называется периодом вращения и какова его единица измерения? 8. Что называется частотой вращения и какова ее единица измерения?



### Образцы решения задач

**Задача 1.** Мяч упал на пол с высоты 3 м, отскочил от пола и был пойман на высоте 1 м. Найти величину пути и перемещения мяча.

**Дано:**  
 $h_0 = 3\text{м};$   
 $h_1 = 1\text{м};$   
 $s = 2$

$|\Delta r| = ?$

**Решение:** Для простоты будем считать, что движение мяча будет направлено по оси  $OY$  (рис.17). Путь, пройденный мячом, равен длине траектории, т. е.  $s = h_0 + h_1$ .

Перемещение мяча

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_0.$$

Если учесть, что

$$|\vec{r}_0| = h_0; \quad |\vec{r}_1| = h_1, \quad \text{то} \quad \Delta r = h_1 - h_0.$$

Подставим данные в найденные выражения:

$$s = 3\text{м} + 1\text{м} = 4\text{м};$$

$$|\Delta r| = |1\text{м} - 3\text{м}| = |-2\text{м}|,$$

Ответ:  $s = 4\text{м}$ ;  $|\Delta r| = 2\text{м}$ .

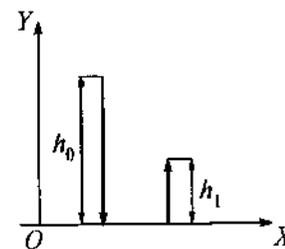


Рис. 17

**Задача 2.** Камень бросили с башни в горизонтальном направлении со скоростью 4 м/с. Если камень через 2 с упадет на землю, определите высоту башни и на каком расстоянии от основания башни камень упадет.

**Дано:**  
 $v_0 = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}};$   
 $t = 2\text{с}$   
 $h = ?$   
 $l = ?$

**Решение:** Если путь камня в вертикальном направлении показывает высоту башни

$$h = \frac{gt^2}{2},$$

то путь, пройденный в горизонтальном

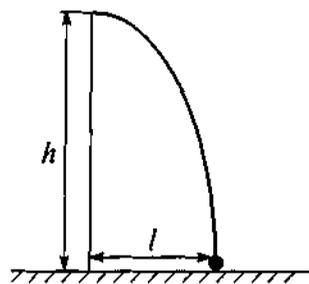


Рис. 18

направлении, покажет расстояние, на котором от основания башни упадет камень:

$$l = v_0 t.$$

Подставив численные значения данных, найдем:

$$h = \frac{9,81 \cdot 4}{2} \text{ м} = 19,62 \text{ м};$$

$$l = 4 \cdot 2 \text{ м} = 8 \text{ м}.$$

Ответ:  $h = 19,62 \text{ м}$ ;  $l = 8 \text{ м}$ .



### Задачи для самостоятельного решения

1. Материальная точка переместилась из точки с координатами  $x_1 = 0$ ;  $y_1 = 2 \text{ м}$  в точку с координатами  $x_2 = 4 \text{ м}$  и  $y_2 = -1 \text{ м}$ . Найти путь, пройденный материальной точкой, перемещение и проекцию перемещения на оси координат.

$$(s = |\Delta r| = 5 \text{ м}; |\Delta r_x| = 4 \text{ м}; |\Delta r_y| = 3 \text{ м})$$

2. Велосипедист за первые 5 с проехал 40 м, за следующие 10 с — 100 м и за последние 5 с — 20 м. Найти средние скорости на каждом из участков и на всем пути.

$$(v_1 = 8 \text{ м/с}; v_2 = 10 \text{ м/с}; v_3 = 4 \text{ м/с}; v_{\text{ср}} = 8 \text{ м/с})$$

3. За какое время автомобиль, двигаясь с ускорением  $0,4 \text{ м/с}^2$ , увеличит свою скорость с 12 до 20 м/с? ( $t = 20 \text{ с}$ )

4. Высота башни 57,5 м. Сколько времени падало тело с этой башни и какова скорость тела при ударе о землю?

$$(t = 3,4 \text{ с}; v = 33,6 \text{ м/с})$$

### Тестовые вопросы

1. Физическая величина, характеризующая путь, пройденный материальной точкой в единицу времени, называется...

- А. Ускорение. В. Скорость.  
С. Перемещение. Д. Путь. Е. Правильного ответа нет.

2. Что характеризует изменение модуля скорости?

- А. Тангенциальное составляющее ускорения.  
В. Ускорение.  
С. Нормальное составляющее ускорения.  
Д. Центробежное ускорение.  
Е. Правильные ответы В и С.

3. Что характеризует изменение направления скорости?

- А. Нормальное составляющее ускорения.  
В. Центробежное ускорение.  
С. Тангенциальное составляющее ускорения.  
Д. Касательное ускорение.  
Е. Правильные ответы А и В.

4. Какое движение выражается как  $a_{\tau} = 0$ ,  $a_n = 0$ ?

- А. Прямолинейное равномерное движение.  
В. Криволинейное равномерное движение.  
С. Равномерное движение по окружности.  
Д. Прямолинейное неравномерное движение.  
Е. Прямолинейное равнопеременное движение.

### Основные выводы

*Механическим движением* называют изменение положения тел или частей тел относительно друг друга.

*Материальной точкой* называют тело известной массы, размерами которой в данных условиях можно пренебречь.

*Абсолютно твердым телом* называют недеформируемое при любых состояниях, другими словами — тело, у которого расстояние между двумя любыми точками остается постоянным при любой действующей силе.

*Поступательным движением твердого тела* называют движение твердого тела, при котором любая прямая, жестко связанная с ним, перемещается, оставаясь параллельной самой себе.

*Системой отсчета* называют систему, показывающую при механическом движении изменение положения тела относительно другого тела.

*Векторной величиной* называют физическую величину, для определения которой необходимо указать кроме числового значения также и направление.

*Вектором скорости* называют величину, определяемую отношением вектора перемещения материальной точки на время, в течение которого эти перемещения совершались. Единица скорости в СИ —  $1 \text{ м/с}$ .

*Вектором ускорения* называют величину, определяемую отношением изменения вектора скорости на время, в течение которого это изменение произошло. Единица ускорения в СИ —  $1 \text{ м/с}^2$ .

*Свободным падением* называют движение, происходящее только под действием силы тяжести.



## ГЛАВА II. ДИНАМИКА

Как было сказано выше, динамика рассматривает законы движения тел и те причины, которые его вызывают или изменяют. Поэтому динамика является основным разделом механики. Основу динамики составляют законы Ньютона. Эти законы изложены в труде И. Ньютона, изданном в 1682 году, «Математические основы натуральной философии».



### § 8. Первый закон Ньютона



И. Ньютон  
(1643 – 1727)

Содержание: первый закон Ньютона; инерциальная система отсчета; инертность, масса, понятия силы.

Первый закон Ньютона формулируется следующим образом: **всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, пока и поскольку на него не действуют другие тела.**

Уместность этого закона в повседневной жизни показывает сохранение состояния покоя мячом в поле до удара футболистом, качание назад в начале движения автобуса и вперед при остановке движущегося автобуса.

Вместе с этим первый закон Ньютона взаимосвязан с понятием инертности.

**Инертность.** *Инертностью называют свойство тела сохранять состояние покоя или прямолинейного движения.* Поэтому первый закон Ньютона называют законом инерции. Законы Ньютона выполняются только в инерциальных системах отсчета.

**Инерциальная система отсчета.** Системы отсчета, в которых выполняются законы Ньютона, называются *инерциальными системами отсчета.* Любая система отсчета, находящаяся в состоянии покоя или движущаяся прямолинейно и равномерно относительно инерциальной системы отсчета, также является инерциальной системой отсчета.

Опыт показывает, что гелиоцентрическую (начало координаты находится в центре Солнца) систему отсчета можно считать инерциальной системой отсчета.

В физике многие системы рассматриваются в качестве инерциальных систем отсчета, так как в этих случаях допускаемые ошибки бывают незначительными и ими можно пренебречь.

Любые системы отсчета, в которых не выполняются законы Ньютона, называют неинерциальными системами отсчета.

Теперь ознакомимся с понятиями *масса* и *сила*, столь важными в динамике.

**Масса.** Масса тела является одной из основных характеристик материи и определяет ее свойство инертности. Другими словами, тело, которое имеет большое стремление сохранить состояние покоя или прямолинейное равномерное движение, имеет большую массу. В физике принято обозначать массу буквой  $m$ . В системе СИ за единицу массы принят один килограмм, т.е.  $[m] = 1 \text{ кг}$ . Чтобы изменить состояние покоя или прямолинейного равномерного движения тела, надо оказать на нее внешнее воздействие. Чтобы характеризовать это воздействие, вводят понятие **силы**.

**Сила.** Значит, под воздействием силы тело изменяет свою скорость, т.е. приобретает ускорение. Под воздействием силы тело может и деформироваться, т.е. изменять свою форму и размеры. Это называется *статическим проявлением силы*. Сила является векторной величиной.

Характеризуется сила не только численным значением, но и направлением, а также к какой точке приложено.

*Сила — это векторная величина и является мерой механического воздействия на тело со стороны других тел, а также полей и в результате этого воздействия тело приобретает ускорение или изменяет свою форму и размеры.*

В физике принято обозначить силу буквой  $F$ .

Возникает вопрос: как изменяется механическое движение тела под действием силы? На этот вопрос дает ответ второй закон Ньютона.



#### Вопросы для самопроверки

1. Кто такой И. Ньютон и в чем состоят его заслуги перед наукой?
2. В чем заключается значение законов Ньютона? 3. Расскажите о первом законе Ньютона. 4. Приведите три примера, показывающие уместность первого закона Ньютона. 5. Что такое инертность? В чем заключается связь и различие между инертностью и массой? 6. Во всех ли системах отсчета действуют законы Ньютона? 7. Какую систему отсчета называют инерциальной системой отсчета? 8. Существует ли инерциальная система отсчета? 9. Какой величиной является сила?



## § 9. Второй закон Ньютона

**Содержание:** второй закон Ньютона; количество движения (импульс); импульс силы; принцип независимости действия сил.

Проведем следующий эксперимент: Сначала рассмотрим действие различных сил на тело с постоянной массой ( $m = \text{const}$ ). Например, пусть футбольный мяч пинают маленький мальчик, юноша и футболист. Естественно, мяч приобретает самое большое ускорение, когда его пинает футболист, другими словами, ускорение, которое приобретает тело, прямо пропорционально силе, которая на нее действует, т. е.  $a \sim F$ .

Теперь рассмотрим случай ( $F = \text{const}$ ), когда футболист пинает резиновый мяч, футбольный мяч и мяч для тренировки боксеров. Этот эксперимент показывает, что при действии с одинаковой силой ускорение, которое приобретает тело, обратно пропорционально ее массе, т. е.

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

Если обобщить вышеприведенные выводы, то получим

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

И приняв во внимание, что ускорение  $\vec{a}$  и сила  $\vec{F}$  — векторные величины, —

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (9.1)$$

Эта формула выражает второй закон Ньютона: **ускорение, приобретаемое телом, прямо пропорционально силе, действующей на это тело, и обратно пропорционально массе тела, направление же совпадает с направлением действующей силы.**

Если выражение (9.1) определяет силу,

$$\text{то } \vec{F} = m\vec{a}, \quad (9.2)$$

т. е. выражение (9.2) дает возможность определить, чему равна единица силы в СИ (ньютон):

$$\{F\} = \{m\} \cdot \{a\} = \text{кг} \cdot \text{л} \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = \text{л} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} = \text{лН}.$$

Силой 1Н называют силу, сообщающую телу массой 1 кг ускорение  $1\text{м}/\text{с}^2$ .

Когда говорят об изменении механического движения, также используется понятие „количество движения“.

**Количество движения (импульс).** Чтобы определить значение количества движения, проведем следующие опыты.

Пусть на дороге неподвижно стоит тележка массой  $m = 100$  кг. В нее ударился мяч массой  $m = 0,01$  кг, летящий со скоростью  $v = 10$  м/с. Хотя мяч и отскакивает назад, но сдвинуть тележку не сможет. Теперь пусть с тележкой столкнется точно такая же вторая тележка массой  $m = 100$  кг, движущаяся со скоростью  $v = 10$  м/с. Она сдвинет неподвижную тележку. Значит, чтобы сдвинуть тележку, необходима не только большая скорость мяча, но и величина, зависящая как от скорости, так и от массы. Эта величина называется количеством движения.

*Количеством движения тела (импульсом) называют векторную величину, равную произведению массы тела на вектор скорости и направление которой совпадает с направлением вектора скорости:*

$$\vec{P} = m\vec{v}. \quad (9.3)$$

$$\text{Единица ее в СИ } [P] = [m][v] = \text{кг} \cdot \text{л} \frac{\text{м}}{\text{с}} = \text{лкг} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

**Изменение импульса тела.** Согласно второму закону Ньютона, независимо от того, в каком состоянии находится тело, скорость может изменяться только под действием силы, т. е. может приобретать ускорение. Пусть на тело массой  $m$  в течение времени  $t$  действует сила  $F$  и пусть скорость тела изменится от  $\vec{v}_0$  до  $\vec{v}$ . Тогда формулу для ускорения тела можно записать в виде

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}. \quad (9.4)$$

При помощи этого выражения формулу (9.2) можно записать в следующем виде:

$$\vec{F} = m\vec{a} = \frac{m(\vec{v} - \vec{v}_0)}{t}.$$

Отсюда

$$\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0 = \vec{P} - \vec{P}_0 = \Delta\vec{P},$$

или

$$\vec{F}t = \Delta\vec{P}. \quad (9.5)$$

Таким образом, изменение импульса тела  $\Delta\vec{P}$  будет равно величине, вызывающей такое изменение и называемой импульсом силы  $\vec{F}t$ . Выражение (9.5) может быть записано и в такой форме:

$$\vec{F}_{\text{cp}} \cdot \Delta t = \Delta\vec{p} = m(\vec{v} - \vec{v}_0).$$

**Можно ли выразить второй закон Ньютона с помощью импульса?** Для этого напишем выражение (9.2) и учтем, что в нем

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}, \text{ т. е.}$$

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

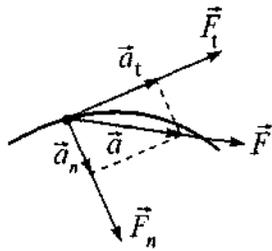


Рис. 19

Из курса математики известно, что постоянную величину можно записать введя ее под знак дифференциала. Из классической механики  $m = const$

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}, \quad (9.6)$$

или согласно (9.3)

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt}.$$

Это более общий вид второго закона Ньютона: *скорость изменения импульса тела равна действующей на нее силе.*

Выражение (9.6) называется уравнением движения материальной точки или основным уравнением динамики поступательного движения материальной точки.

**Принцип независимости действующих сил.** Если на материальную точку одновременно действует несколько сил, тогда каждая сила сообщает ей ускорение согласно второму закону Ньютона, как будто других сил не было. Это правило называют принципом независимости действия сил.

Согласно этому принципу силу так же, как и ускорение можно разложить на составляющие, т. е. соответственно направлению тангенциальной составляющей ускорения  $a_t$  на тангенциальную силу  $F_t$ , направленную по касательной к направлению движения, и соответственно направлению нормальной составляющей ускорения  $a_n$  на нормальную силу  $F_n$ , направленную к центру кривизны траектории (рис. 19).

Учитывая, что  $a_t = \frac{dv}{dt}$  и  $a_n = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$  и на основании второго закона Ньютона, получаем

$$F_t = ma_t = m \frac{dv}{dt}, \quad (9.7)$$

$$F_n = ma_n = m \frac{v^2}{R} = m\omega^2 R. \quad (9.8)$$

Если на материальную точку действует несколько сил, то согласно принципу независимости сил силу  $\vec{F}$  во втором законе Ньютона можно рассматривать как равнодействующую этих сил.



### Вопросы для самопроверки

1. Зависит ли ускорение тела от массы и силы? 2. На чем основывается второй закон Ньютона? 3. Для чего нужно вводить понятие „количество движения“? 4. Что такое количество движения и его направле-

ние? 5. Что такое импульс силы? 6. На чем основывается принцип независимости действия силы? 7. Что такое равнодействующая сил? 8. Каковы единицы силы и импульса в системе СИ?



## § 10. Третий закон Ньютона

**Содержание:** третий закон Ньютона; вид законов Ньютона во всех инерциальных системах отсчета.

**Третий закон Ньютона.** Мы говорили о действии какого-то тела или тел на другое тело. Естественно, возникает вопрос, как ведет себя тело, на которое оказывается действие. Как показывают опыты, это тело тоже оказывает действие силой, равной действию, оказываемого на него и направленное в противоположную сторону. Такое взаимное действие между материальными точками (телами) определяется при помощи третьего закона Ньютона: **Любое действие материальных точек друг на друга носит характер взаимодействия. Величины сил, действующих между материальными точками, всегда равны по модулю, противоположно направлены и действуют вдоль прямой, соединяющей их.**

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}.$$

Например, пусть два лодочника держатся за разные концы веревки. Отметим ровно середину расстояния между ними. Теперь пусть один из лодочников потянет за веревку. Второй пусть держит конец веревки. Увидим, что лодки встретятся ровно посередине расстояния. Эти опыты можно проводить и с конькобежцами на роликах (рис. 20). Эти опыты показывают уместность третьего закона Ньютона.

**Имеют ли законы Ньютона один и тот же вид во всех инерциальных системах отсчета?** Мы выше говорили, что законы Ньютона составляют основу классической механики. Также мы отметили, что эти законы выполняются во всех инерциальных системах отсчета. Но мы не остановились на вопросе, все ли они имеют одинаковый вид во всех инерциальных системах отсчета. Как показывают опыты, законы Ньютона име-

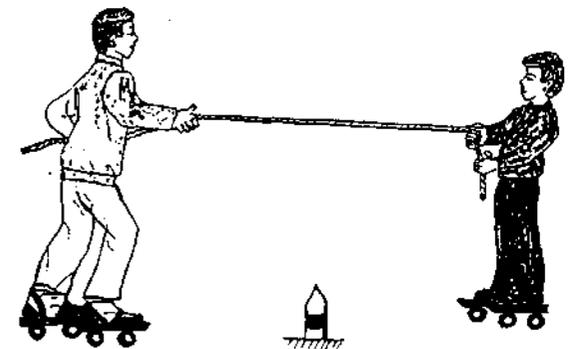


Рис. 20

ют одинаковый вид во всех инерциальных системах отсчета. Это носит название принципа относительности Галилея. Суть этого принципа более подробно рассмотрим в главе „Основы специальной теории относительности“.



### Вопросы для самопроверки

1. Как себя ведет тело, на которое действует сила? 2. На чем основывается третий закон Ньютона? 3. Каким будет направление взаимодействующих сил? 4. Приведите три примера, иллюстрирующих третий закон Ньютона. 5. Имеют ли одинаковый вид законы Ньютона во всех инерциальных системах отсчета?



## § 11. Силы трения

**Содержание:** сила трения, ее проявление, причины появления и виды; коэффициент трения; значение трения; движение тела по наклонной плоскости.

**Проявление сил трения.** Толкнем книгу, лежащую на столе. Книга приходит в движение на горизонтальной поверхности стола, и если не оказывать другого действия, замедляя свое движение, через определенное время остановится. В чем причина остановки книги? Причина этому — сила трения, возникающая между соприкасающимися поверхностями и препятствующая движению книги на столе. На основании данного примера, мы видим, что сила трения зависит от скорости трущихся тел.

**Виды трения.** Обычно разделяют внешнее и внутреннее трение. *Внешним* называется трение, возникающее между поверхностями, когда одно из двух соприкасающихся тел движется по поверхности другого тела.

Пример, приведенный выше, — трение между соприкасающимися поверхностями книги и стола, иллюстрирует внешнее трение.

Если тела находятся в покое относительно друг друга, такое трение называют *трением покоя*, если скользят — *трением скольжения*, и в зависимости от характера движения — *трением качения*, *трением качения*.

*Внутренним трением* называют трение, возникающее между различными частями одного и того же тела. Обычно внутреннее трение возникает в жидкостях и газах, мы на них остановимся позже.

**Причины, вызывающие внешнее трение.** Основными причинами, вызывающими внешнее трение, являются неровности соприкасающихся поверхностей, т. е. шероховатости. Если поверхность очень гладкая, то трение возникает за счет силы притяжения между молекулами различных тел.

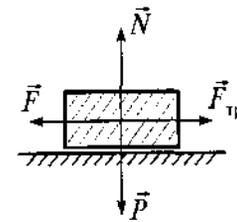


Рис. 21

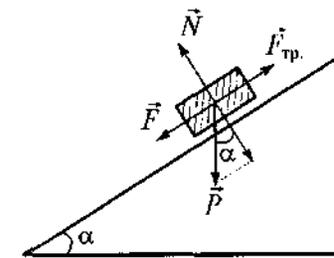


Рис. 22

**Сила трения покоя.** Чтобы определить силу трения  $F_{тр}$ , проведем эксперимент с предметом, лежащим на столе (рис. 21). Чтобы привести тело в движение, к нему прикладывается сила  $F$ . До определенного значения силы  $F$  тело остается в покое. Т. е. сила, возникающая между поверхностями тела и стола, препятствует движению тела по столу.

Сила, возникающая между соприкасающимися поверхностями тел, даже если они находятся в покое относительно друг друга, называется *силой трения покоя*.

Когда величина  $\vec{F}$  будет равна величине  $\vec{F}_{тр}$ , тело, лежащее на столе, придет в движение. Значит,  $\vec{F} = \vec{F}_{тр}$ . Но вместе с этим силы направлены в противоположные стороны:

$$\vec{F} = -\vec{F}_{тр}.$$

**От чего зависит сила трения?** Значение силы  $\vec{F}$ ,двигающей тело, лежащее на столе, возрастает до тех пор, пока не станет равной силе  $\vec{F}_{тр}$ . Тогда чему будет равно значение  $\vec{F}_{тр}$ ? Из законов, определенных из опытов: сила трения скольжения  $\vec{F}_{тр}$  пропорциональна силе нормального давления (сила реакции опоры)  $N$ , т. е.  $F_{тр} = \mu \cdot N$ , где  $\mu$  — так называемый коэффициент пропорциональности, зависит от свойства соприкасающихся поверхностей тел.

**Сила реакции опоры.** Для тела, лежащего в горизонтальном положении (рис. 21), величина силы реакции опоры  $\vec{N}$  и силы давления, оказываемого телом на поверхность стола (сила тяжести)  $\vec{P}$ , равны и направлены противоположно, т. е.

$$\vec{P} = -\vec{N}.$$

Но это выражение не выполняется, если тело находится на наклонной плоскости.

**Движения тела по наклонной плоскости.** Рассмотрим движение тела, лежащего на наклонной плоскости с углом наклона  $\alpha$  (рис. 22). Нам известно, чтобы тело пришло в движение:

$$F = F_{\text{тр}}. \quad (11.1)$$

Теперь определим синус и косинус угла  $\alpha$ :

$$\sin \alpha = \frac{F}{P}, \text{ или } F = P \cdot \sin \alpha, \quad (11.2)$$

$$\cos \alpha = \frac{N}{P}, \text{ или } N = P \cdot \cos \alpha. \quad (11.3)$$

Если при помощи (11.2) и (11.3) перепишем выражение  $F = F_{\text{тр}} = \mu \cdot N$ ,

$$P \sin \alpha = \mu \cdot N = \mu P \cos \alpha, \text{ или } \mu = \operatorname{tg} \alpha_0, \quad (11.4)$$

то начиная с некоторого значения  $\alpha$  равное  $\alpha_0$ , тело приходит в движение и  $\alpha_0$  называется *граничным углом*, при котором тело приходит в движение:

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha_0. \quad (11.5)$$

Таким образом, коэффициент трения  $\mu$  определяется тангенсом угла  $\alpha_0$ , при котором начинается скольжение тела.

**Роль трения в природе и технике.** Значение силы трения в природе и технике велико. Если не было бы трения, то люди и транспортные средства не смогли бы двигаться. Фактором, обеспечивающим это движение, является наличие силы трения между ногами человека и между шинами машин с поверхностью земли. В некоторых случаях трение может принести и вред, в таких случаях необходимо его уменьшить. Для этих целей трущиеся поверхности смазывают различными маслами и используют технические средства вроде подшипников.



### Вопросы для самопроверки

1. В чем причина остановки мальчика, катающегося на льду через некоторое расстояние? 2. Приведите три примера проявления трения. 3. От чего зависит сила трения? 4. Какие бывают виды трения? 5. Что приводит к внешнему трению? 6. Что такое сила трения покоя? 7. Что такое сила реакции опоры? 8. Что такое коэффициент трения? 9. Какое условие должно выполняться, чтобы тело начало скользить по наклонной плоскости? 10. Какая имеется связь между коэффициентом трения и углом наклона? 11. В чем выражается роль трения в движении людей и транспортных средств? 12. Имеется ли вред от трения? Приведите примеры. 13. Методы уменьшения трения.



**Содержание:** неинерциальные системы отсчета; законы Ньютона в неинерциальных системах отсчета; силы инерции и их виды.

**Неинерциальные системы отсчета.** Мы выше утверждали, что законы Ньютона выполняются только в инерциальных системах отсчета. Тогда какими будут законы движения в неинерциальных системах отсчета? Неинерциальными системами отсчета называют системы отсчета, движущиеся с ускорением относительно инерциальных систем отсчета. В таких системах законы Ньютона в общем не выполняются. Но эти законы можно приспособить к неинерциальным системам отсчета. Для этого надо учитывать так называемые силы инерции, присущие неинерциальным системам отсчета.

**Законы Ньютона в неинерциальных системах отсчета.** Ускорение, которое приобретает тело в неинерциальной системе отсчета, прямо пропорционально сумме действующих на него сил (в том числе сил инерции) и обратно пропорционально массе, т. е.

$$\vec{a}' = \frac{\vec{F} + \vec{F}_{\text{ин}}}{m}, \quad (12.1)$$

где  $\vec{a}'$  — ускорение тела в неинерциальной системе отсчета,  $\vec{F}$  — сила, действующая в инерциальной системе отсчета,  $\vec{F}_{\text{ин}}$  — силы инерции, которые также придают телу ускорение. Запишем (12.1) в следующем виде:

$$m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_{\text{ин}}.$$

Если воспользуемся тем, что в инерциальной системе отсчета второй закон Ньютона  $\vec{F} = m\vec{a}$ ,

$$m\vec{a}' = m\vec{a} + \vec{F}_{\text{ин}},$$

где  $\vec{a}$  — ускорение тела в инерциальной системе отсчета.

**Каков характер сил инерции?** Причина возникновения сил инерции в движении какой-либо системы отсчета с ускорением относительно рассматриваемой системы отсчета. Силы инерции проявляются в следующих случаях:

**1. Сила инерции, возникающая в результате поступательного движения с ускорением системы отсчета.** Если неинерциальная система поступательна с ускорением  $\vec{a}_0$ , то на тело в этой системе действует сила инерции:

$$\vec{F} = -m\vec{a}_0.$$

Эта сила прижимает к сиденью пассажира в автобусе, движущегося с ускорением, а при торможении отрывает от сиденья.

**2. Сила инерции, действующая на покоящееся тело в системе отсчета, совершающей вращательное движение.**

Проведем опыт с диском, вращающимся с постоянной угловой скоростью  $\omega$  вокруг своей оси, прошедшей через центр диска. На расстоянии  $R$  от центра диска находится шарик. Из-за движения диска на шарик действует сила инерции:

$$F_m = -m\omega^2 R.$$

Эта сила называется центробежной силой инерции. Под действием этой силы шарик вылетает за диск.

**3. Сила инерции, действующая на тело, движущегося в системе отсчета, совершающего вращательное движение.**

В предыдущем опыте мы рассмотрели случай движения шарика вдоль радиуса со скоростью  $v$ , т.е.  $\vec{v} \perp \vec{\omega}$ . Тогда на тело действует сила инерции Кариолиса:

$$\vec{F}_k = 2m[\vec{v}\vec{\omega}].$$

Присутствие этой силы приводит к большему размыванию правого берега реки и разрушению правой стороны железнодорожных рельсов в северном полушарии Земли и большему размыванию левого берега реки и разрушению левой стороны железнодорожных рельсов в южном полушарии Земли.

Необходимо особо отметить, что силы инерции возникают не за счет действия тел, а за счет движения системы отсчета с ускорением.



### Вопросы для самопроверки

1. Что такое неинерциальные системы отсчета? 2. Какой вид имеют законы Ньютона в неинерциальных системах отсчета? 3. Какие силы называются силами инерции? 4. В чем причина возникновения сил инерции? 5. В чем заключается сила инерции, возникающая в системе движущегося поступательно с ускорением тела? Приведите примеры. 6. Сила инерции, действующая на покоящееся тело в системе, совершающей вращательное движение. 7. Как действует сила Кариолиса?



### Примеры решения задач

**Задача 1.** Сила 60 Н сообщает телу ускорение  $0,8 \text{ м/с}^2$ . Какая сила сообщит этому телу ускорение  $2 \text{ м/с}^2$ ?

**Дано:**

$$F_1 = 60 \text{ Н}; \\ a_1 = 0,8 \text{ м/с}^2;$$

**Решение.** Для второго случая напишем второй закон Ньютона:

$$F_2 = m_2 a_2 = m a_2.$$

$$\frac{a_2 = 2 \text{ м/с}^2; \\ m = m_1 = m_2}{F_2 = ?}$$

Чтобы воспользоваться этим выражением, не хватает значения массы, и поэтому для первого случая напишем второй закон Ньютона:

$$F_1 = m_1 a_1 = m a_1.$$

Из этого выражения находим  $m$ :  $m = \frac{F_1}{a_1}$ , и подставим его в

предыдущую формулу:  $F_2 = \frac{F_1 \cdot a_2}{a_1}$ .

Подставим данные:

$$F_2 = \frac{60 \cdot 2}{0,8} \text{ Н} = 150 \text{ Н}.$$

Ответ:  $F_2 = 150 \text{ Н}$ .

**Задача 2.** Лошадь равномерно тянет груз массой 23 т. Найти коэффициент трения, если сила тяги лошади 2,3 кН.

**Дано:**

$$\frac{m = 23 \text{ т} = 23 \cdot 10^3 \text{ кг} \\ F = 2,3 \text{ кН} = 2,3 \cdot 10^3 \text{ Н}}{\mu = ?}$$

**Решение.** Чтобы равномерно тянуть груз, сила тяги и сила трения должны быть равны, т.е.  $F = F_{\text{тр}}$ . Если учесть, что  $F_{\text{тр}} = \mu \cdot N$  и сила реакции опоры  $|\vec{N}| = |\vec{P}| = |m\vec{g}|$ , получим следующее выражение:

$$F = \mu N = \mu mg.$$

Отсюда

$$\mu = \frac{F}{mg}.$$

Используя данные и  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ , находим

$$\mu = \frac{2,3 \cdot 10^3 \text{ Н}}{23 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \text{ кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = \frac{2,3}{225,4} = 0,01.$$

Ответ:  $\mu = 0,01$ .



### Задачи для самостоятельного решения

1. Какое ускорение может получить самолет массой 60 т и силой тяги двигателя 90 кН? ( $a = 1,5 \text{ м/с}^2$ ).

2. Мяч массой 0,5 кг после удара, длящегося 0,02 с, приобретает скорость 10 м/с. Найти среднюю силу удара.

3. Через сколько времени после начала торможения остановится автобус, движущийся со скоростью 12 м/с, если коэффициент трения при торможении равен 0,4?

## Тестовые вопросы

1. Свойства тела сохранять состояние покоя или прямолинейного равномерного движения называется...?

А. Масса; В. Сила; С. Инертность; D. Давление; Е. Инвариант.

2. Какая связь имеется между коэффициентом трения и углом наклона плоскости?

А.  $\mu = F_{\text{тр}}/N$ . В.  $N = P \cdot \cos \alpha$ . С.  $\mu = \sin \alpha / \cos \alpha$ .  
D.  $\mu = \operatorname{tg} \alpha_0$ . Е. Правильные ответы В и С.

3. Какой величиной является сила?

А. Векторной величиной.  
В. Мерой механического действия на тело со стороны других тел и полей, сообщает телу ускорение.  
С. Изменяющей форму и размеры тела.  
D. Правильные ответы А, В, С.  
Е. Правильные ответы А и В.

## Основные выводы

**Первый закон Ньютона:** Каждое тело сохраняет свое состояние покоя или прямолинейного равномерного движения, пока действие других тел не заставляет его изменить свое первоначальное состояние.

*Инертностью* называют свойство тела стремиться сохранить состояние покоя или прямолинейного равномерного движения.

*Инерциальной системой отсчета* называют систему отсчета, в которой выполняются законы Ньютона.

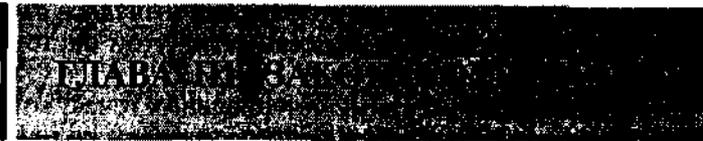
*Масса* тела является одной из основных характеристик материи, показывает свойство инертности тела. Единица массы в СИ — 1 кг.

*Сила* — это векторная величина, является мерой механического воздействия на тело со стороны других тел и полей, в результате этого воздействия тело приобретает ускорение или изменяет свою форму и размеры. Единицей силы в СИ является 1 Н.

**Второй закон Ньютона:** ускорение, приобретаемое телом, прямо пропорционально приложенной силе и обратно пропорционально массе тела, направление силы совпадает с направлением движения:  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ .

Количеством движения (импульсом) тела называется векторная величина, равная произведению массы тела на вектор скорости, направление которой совпадает с направлением вектора скорости:  $\vec{P} = m\vec{v}$ .

**Третий закон Ньютона.** Любое действие материальных точек друг на друга носит характер взаимодействия. Величины сил, действующих между материальными точками, направлены в противоположные стороны и действуют по прямой линии, соединяющей их:  $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ .



Мы знаем, что физика изучает основные свойства материи, законы движения веществ и полей. Движение материи, т. е. веществ и полей происходит в пространстве и времени. Если это так, то возникает вопрос: существуют ли универсальные законы, выстраивающиеся в известный порядок все процессы, происходящие в пространстве и времени? Такие законы существуют и в физике. Они называются законами сохранения. Правильность тех или иных теорий, результатов эксперимента проверяется именно выполнением этих законов.

На чем были основаны эти законы? Так как движение материи происходит в пространстве и времени, эти универсальные законы тоже опираются на пространство и время, т. е. должны быть обоснованы их свойствами. Эти свойства: однородность и изотропность пространства, однородность времени.

**Однородность пространства.** Когда говорят об однородности пространства, понимается равносильность всех его точек. Другими словами, протекание физического процесса происходит одинаково независимо от того, в какой точке пространства проводится эксперимент. Закон сохранения количества движения (импульса) — результат однородности пространства.

**Изотропность пространства.** Когда говорят об изотропности пространства, то понимают равносильность всех его направлений. Другими словами, протекание физического процесса происходит одинаково независимо от того, в каком направлении пространства проводится эксперимент. Закон сохранения момента количества движения (момента импульса) — результат изотропности пространства.

**Однородность времени.** Когда говорят об однородности времени, то понимают равносильность каждого его момента. Другими словами, протекание физического процесса абсолютно не зависит от того, когда начинается эксперимент (утром в восемь часов или вечером в десять часов). Закон сохранения энергии — результат однородности времени.



**С о д е р ж а н и е:** замкнутая система; закон сохранения импульса в замкнутой системе; закон сохранения импульса как результат однородности пространства; пространство; реактивное движение.

**Замкнутая система:** Закон сохранения импульса рассматривается в замкнутой системе. Модель замкнутой системы — тоже одна из широко используемых в физике.

Сначала рассмотрим сумму материальных точек, которые можно рассматривать как единое целое, и назовем ее механической системой.

Силы, действующие между материальными точками, входящими в механическую систему, называют *внутренними силами*. Силы, действующие на материальные точки, входящие в механическую систему со стороны внешних тел, называют *внешними силами*. Механическую систему, на которую не действуют внешние силы, называют *замкнутой системой*.

**Закон сохранения импульса для замкнутой системы.**

Запишем импульс каждой материальной точки, входящей в замкнутую систему. Нам известно, что импульс материальной точки определяется векторной величиной в виде

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (13.1)$$

Полный импульс замкнутой системы  $\vec{P}$  состоит из векторной суммы импульсов  $m_1\vec{v}_1, m_2\vec{v}_2, \dots, m_n\vec{v}_n$  каждой материальной точки, входящей в замкнутую систему:

$$\vec{P} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \dots + m_n\vec{v}_n = \sum_{i=1}^n m_i\vec{v}_i. \quad (13.2)$$

Для замкнутой системы

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^n m_i\vec{v}_i = \text{const}. \quad (13.3)$$

Это выражение отображает закон сохранения импульса. Импульс замкнутой системы сохраняется, т. е. не меняется со временем.

Закон сохранения импульса является одним из основных законов природы, он полностью выполняется не только в классической механике, но и во всех разделах физики. До настоящего времени в природе не встречался процесс, где бы не выполнялся закон сохранения импульса.

**Реактивное движение.** Закон сохранения импульса дает возможность решить многие технические задачи. Хорошим примером этого может быть реактивное движение. Ракета массой  $M_p$  стоит на стартовой позиции. Ракета находится в покое и  $v_p = 0$ . Значит, импульс ее тоже равен нулю. Теперь поджигается топливо, находящееся в топливном отсеке. В камере сгорания поток газа, разогретый до высокой температуры, вырывается из сопла ракеты со скоростью  $v_1$ . В результате ракета начинает двигаться со скоростью  $v_p$ . Масса газа  $m$ , вырывающаяся из сопла

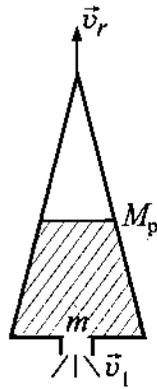


Рис. 23

ракеты, намного меньше массы ракеты ( $m \ll M$ ), будем считать, что после начала движения масса ракеты  $M$  остается без изменения (рис. 23).

Теперь напишем закон сохранения импульса для замкнутой системы ракеты — газ — топливо и здесь учтем, что до сгорания топлива в топливном отсеке импульс системы равен нулю.

$$M\vec{v}_p + m\vec{v}_1 = 0.$$

Отсюда  $M\vec{v}_p = -m\vec{v}_1$ , или для скорости ракеты получим выражение  $\vec{v}_p = \frac{m}{M}\vec{v}_1$ .

Реактивное движение основано на принципе, изложенном выше, т. е. основано на приведении в движение друг друга тел в замкнутой системе.



### Вопросы для самопроверки

1. Какую роль выполняют законы сохранения? 2. На чем основаны законы сохранения? 3. Какие свойства существуют у пространства и времени? 4. Что понимается под однородностью пространства? Какой закон сохранения является результатом этого? 5. Что понимается под изотропностью пространства? Какой закон сохранения является результатом этого? 6. Что понимается под однородностью времени? Какой закон сохранения является результатом этого? 7. Какая система называется замкнутой? 8. В чем заключается закон сохранения импульса? 9. На каком законе основано реактивное движение? 10. От чего зависит скорость ракеты?



## § 14. Энергия, работа и мощность

**Содержание:** энергия; механическая работа; мощность; единицы работы и мощности.

**Энергия.** Энергия (от греч. *energeia* — действие) — это универсальная количественная мера различных форм движения и взаимодействий. В зависимости от формы движения материи энергия тоже бывает различной. Например, механическая, тепловая, электромагнитная, ядерная и др. В результате взаимодействия энергия из одного вида превращается в другой. Но во всех этих процессах энергия, переданная из первого тела во второе (в независимости от формы) равна энергии, которую получает второе тело от первого.

Из второго закона Ньютона известно, чтобы изменить механическое движение тела, на него надо оказать действие со стороны других тел. Другими словами, между этими телами происходит обмен энергиями. В механике, чтобы изобразить такой об-

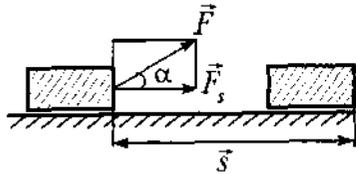


Рис. 24

мен энергией, введено понятие механической работы и она в физике обозначается буквой  $A$ .

**Механическая работа.** Механической работой называют величину, равную скалярному произведению силы на перемещение, совершенное под действием этой силы, т. е.

$$A = (\vec{F} \cdot \vec{s}) = F \cdot s \cdot \cos \alpha, \quad (14.1)$$

где  $\alpha$  — угол между вектором силы  $\vec{F}$  и перемещением  $\vec{s}$  (рис. 24).

Если учесть, что  $\cos \alpha = \frac{F_s}{F}$  и  $F_s = F \cdot \cos \alpha$ , то выражение (14.1) примет следующий вид:

$$A = F \cdot s \cdot \cos \alpha = F_s \cdot s, \quad (14.2)$$

где  $F_s$  — проекция силы на направление перемещения.

Основываясь на выражение (14.2), можно сделать следующие выводы: если  $\alpha < \frac{\pi}{2}$ , то  $0 < \cos \alpha < 1$ , т. е. работа силы положительная, направление силы и перемещения совпадают, если  $\alpha > \frac{\pi}{2}$ , то  $-1 < \cos \alpha < 0$ , т. е. работа силы отрицательная, сила и перемещение направлены противоположно;

если  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , то  $\cos \alpha = 0$ , т. е. работа силы равна нулю, направление силы перпендикулярно перемещению.

**Единица работы.** Единица работы в СИ — джоуль (Дж):

$$[A] = [F] \cdot [s] = 1\text{Н} \cdot 1\text{м} = 1\text{Н} \cdot \text{м} = 1\text{Дж}.$$

В качестве единицы работы в СИ принята работа силы в 1 Н на пути в 1 м.

**Мощность.** Для изображения работы, выполненной в единицу времени, введена величина *мощность*, которая обозначается буквой  $N$ .

*Мощностью* называют величину, равную отношению совершенной работы к промежутку времени, за которое она была совершена:

$$N = \frac{A}{t}.$$

Если учесть, что элементарная работа  $A = F_s \cdot s$ , то

$$N = \frac{F_s \cdot s}{t} = F_s \cdot v.$$

**Единица мощности.** Чтобы найти единицу мощности в СИ, воспользуемся данным определением:

$$N = \frac{[A]}{[t]} = \frac{1\text{Дж}}{1\text{с}} = 1\text{Вт}.$$

Эта единица называется ватт (Вт).

В качестве единицы мощности в СИ принята мощность устройства, выполняющая работу 1 Дж за 1 с.



### Вопросы для самопроверки

1. Что такое энергия? 2. Назовите виды энергии и на основании чего они делятся на виды. 3. С какой целью введено понятие механической работы? 4. Как определяется механическая работа? 5. Зависит ли механическая работа от угла между силой и перемещением? 6. Какова единица работы в СИ? 7. Что такое мощность? Какова единица мощности в СИ?



**Содержание:** механическая энергия; кинетическая и потенциальная энергии; потенциальная энергия поднятого тела; единицы энергии.

**Механическая энергия.** Механической энергией называется количественная мера механических движений и взаимодействий.

По состоянию различают энергию кинетическую и потенциальную.

**Кинетическая энергия.** Кинетической энергией системы называют энергию, получаемую системой в результате механического движения. Тело массой  $m$  под действием силы  $F$  приходит в движение и приобретает скорость  $v$ . В результате этого энергия возрастает на количество, равное работе, выполняемой силой. Тело массой  $m$ , движущееся со скоростью  $v$ , приобретает кинетическую энергию, равную:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (15.1)$$

Кинетическая энергия тела равна половине произведения массы тела на квадрат скорости.

**Потенциальная энергия.** Потенциальной энергией системы тел называется энергия, зависящая от взаимного расположения тел и от характера сил взаимодействия между ними.

Скажем, взаимодействие тел происходит в каком-то поле. Пусть работа, выполненная в этом поле, зависит не от траектории, по которой движется тело, а от его начального и конечного положения. Такое поле называется потенциальным, а силы, действующие в нем, называются консервативными. Любое тело в потенциальном поле обладает потенциальной энергией  $E_n$ .

**Потенциальная энергия тела, поднятого над землей на высоту  $h$ .** Потенциальная энергия тела массой  $m$ , поднятого над поверхностью земли на высоту  $h$ , определяется выражением

$$E_n = mgh = Ph. \quad (15.2)$$

Если высота  $h$  отсчитывается от нулевого уровня, то потенциальная энергия будет

$$E_n^0 = 0,$$

где  $g$  — ускорение свободного падения;  $P = mg$  — сила тяжести.

Как видно из выражения (15.2), потенциальная энергия тела равна работе, выполненной силой тяжести при падении тела с высоты  $h$ .

**В каких единицах измеряется энергия?** Как было отмечено выше, в результате изменения энергии некоторой системы над механической системой выполняется работа и в свою очередь это снова приводит к изменению энергии. Поэтому на механическую работу смотрят как на величину, выражающую обмен энергией. Отсюда можно сделать вывод, что единица работы и энергии одна и та же. Значит, единица энергии в СИ будет 1 джоуль (Дж).



#### Вопросы для самопроверки

1. Что такое механическая энергия? Расскажите о видах механической энергии. 2. Какая энергия называется кинетической? 3. Какая энергия называется потенциальной? 4. Какое поле называется потенциальным? 5. Чему равна потенциальная энергия тела, находящегося на высоте  $h$ ? 6. Какая связь существует между потенциальной энергией и работой силы тяжести? 7. Чему равна потенциальная энергия тела, находящегося на поверхности Земли? 8. Какова единица энергии?



#### § 16. Закон сохранения энергии

**Содержание:** полная механическая энергия; закон сохранения полной механической энергии; закон сохранения и превращения энергии.

**Полная механическая энергия.** Полной механической энергией системы называется сумма его кинетической и потенциальной энергии:

$$E = E_k + E_n. \quad (16.1)$$

**Сохранение полной механической энергии.** Полная механическая энергия сохраняется, т.е. не изменяется со временем:

$$E = E_k + E_n = \text{const.}$$

Как было отмечено выше, закон сохранения энергии есть результат однородности времени. К примеру, потенциальная энер-

гия тела, падающего с высоты  $h$ , зависит от силы тяжести тела и абсолютно не зависит от времени проведения эксперимента.

В природе происходит превращение одного вида энергии в другой. Примером этому может быть превращение механической энергии, возникающей в результате трения, в тепловую энергию.

**Выполняется ли в природе закон сохранения энергии?** Проведенные во множестве эксперименты и теоретические заключения показывают категорическое выполнение закона сохранения энергии. Только в природе происходит превращение одного вида энергии в другой (например, механической энергии в тепловую энергию). Поэтому этот закон называется законом сохранения и превращения энергии. Он является основным законом природы и имеет место не только для макроскопических, но и для системы микротел.

Таким образом, энергия никогда не исчезает, но и не появляется из ничего. Она только может превращаться из одного вида в другой. В замкнутой системе полная энергия сохраняется. В природе еще не известен процесс, в котором не выполнялся бы закон сохранения энергии.



#### Вопросы для самопроверки

1. Какую энергию называют полной механической энергией? 2. Сохраняется ли полная механическая энергия? 3. Результатом какого свойства времени является закон сохранения энергии? 4. Выполняется ли в природе закон сохранения энергии? 5. Что вы знаете о законе сохранения и превращения энергии?



#### § 17. Абсолютное упругое и неупругое соударения тел

**Содержание:** соударение; значение соударения в природе; абсолютное упругое и неупругое соударения.

**Что называется соударением? Его роль в природе.** Соударением называют кратковременное взаимодействие двух или более тел. Соударение встречается в природе очень часто. Столкновение бильярдных шаров, прыжок человека на землю, забивание гвоздя молотком, удар футболиста по мячу и другие могут быть примером соударения.

От вида деформации в результате соударения они делятся на два вида: абсолютно упругое и абсолютно неупругое соударения.

**Абсолютно неупругое соударение.** Абсолютно неупругим соударением называется соударение двух деформируемых шаров. После соударения шары могут двигаться совместно. Примером этому могут быть соударения шаров, сделанных из пластилина или глины (рис. 25). Пусть шары массой  $m_1$  и  $m_2$  до соударения имеют

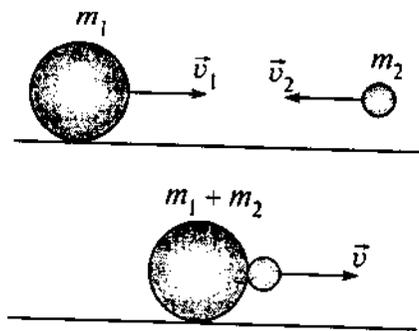


Рис. 25

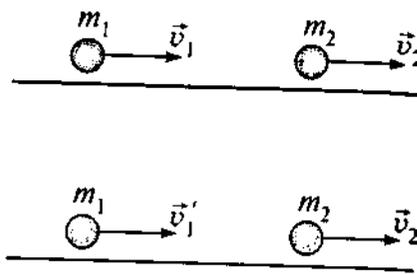


Рис. 26

скорости соответственно  $v_1$  и  $v_2$ . Если после соударения скорость будет  $v$ , то применяя закон сохранения импульса, получим следующее:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{v}.$$

Отсюда 
$$\vec{v} = \frac{m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2}{m_1 + m_2}. \quad (17.1)$$

Если массы шаров будут равны:  $m = m_1 = m_2$ , тогда

$$\vec{v} = \frac{\vec{v}_1 + \vec{v}_2}{2}. \quad (17.2)$$

При абсолютно неупругом соударении закон сохранения механической энергии не выполняется, часть ее превращается во внутреннюю энергию шаров.

**Абсолютно упругое соударение.** Абсолютно упругим соударением называют соударение недеформируемых шаров. Здесь кинетическая энергия шаров до соударения и после соударения полностью переходит в кинетическую энергию.

При абсолютно упругом соударении выполняются законы сохранения импульса и кинетической энергии. Пусть шары массой  $m_1$  и  $m_2$  до соударения имеют скорости соответственно  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$ , а после соударения  $\vec{v}_1'$  и  $\vec{v}_2'$ . Учитывая направления их движения, возьмем движение, направленное вправо, с положительным знаком, а движение, направленное влево, — с отрицательным знаком (рис. 26). Для этого случая закон сохранения импульса и кинетической энергии будет следующим:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'. \quad (17.3)$$

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2}. \quad (17.4)$$



### Образцы решения задач

**Задача 1.** Под действием постоянной силы  $F$  вагон прошел путь  $s = 5$  м и приобрел скорость 2 м/с. Найти работу  $A$ , совершенную силой, если масса вагона  $m = 400$  кг и коэффициент трения  $\mu = 0,01$ .

**Дано:**

$$F = \text{const};$$

$$s = 5 \text{ м};$$

$$v = 2 \text{ м/с};$$

$$m = 400 \text{ кг};$$

$$\mu = 0,01.$$

$$A = ?$$

**Решение.** Работа  $A$ , выполненная силой, равна сумме работ  $A_0$  по перемещению вагона и кинетической энергии  $E_k$ , сообщенной вагону:

$$A = A_0 + E_k,$$

где  $A_0$  — работа, выполняющаяся против силы трения

$$A_0 = F_{\text{тр}} S = \mu P S = \mu m g s,$$

учитывая, что  $F_{\text{тр}} = \mu P$  и сила тяжести  $P = mg$ . В свою очередь кинетическая энергия, полученная вагоном

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

Таким образом, работа, выполненная силой  $F$ , определяется как

$$A = \mu m g s + \frac{mv^2}{2}.$$

Используя данные,

$$A = 0,01 \cdot 400 \cdot 9,8 \cdot 5 \text{ Дж} + \frac{1}{2} \cdot 400 \cdot 4 \text{ Дж} = 996 \text{ Дж}$$

· Ответ:  $A = 996$  Дж.

**Задача 2.** Молот массой  $m = 1$  т падает на наковальню с высоты  $h = 2$  м. Время соударения  $t = 0,01$  с. Найти среднюю силу  $F_{\text{сп}}$  соударения.

**Дано:**

$$m = 1 \text{ т} = 10^3 \text{ кг};$$

$$h = 2 \text{ м};$$

$$\Delta t = 0,01 \text{ с}.$$

$$F_{\text{сп}} = ?$$

**Решение.** Для соударения закон сохранения импульса имеет следующий вид:

$$F_{\text{сп}} \cdot \Delta t = m \cdot v,$$

отсюда

$$F_{\text{сп}} = \frac{m \cdot v}{\Delta t}.$$

А также на основании закона сохранения энергии потен-

Потенциальная энергия молота на высоте  $h$  равна  $E_n = mgh$ , кинетическая энергия в момент удара о наковальню  $E_k = \frac{mv^2}{2}$ , т. е.

$$E_n = E_k,$$

или

$$mgh = \frac{mv^2}{2}.$$

Из этого выражения найдем скорость

$$v = \sqrt{2gh}$$

и, подставив в выражение, найденное для  $F_{cp}$ , получим

$$F_{cp} = \frac{m}{\Delta t} \cdot \sqrt{2gh}.$$

Используя данные и что  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ,

$$F_{cp} = \frac{10^3}{0,01} \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2} \text{ Н} = 6,3 \cdot 10^5 \text{ Н} = 630 \text{ кН}$$

Ответ:  $F_{cp} = 630 \text{ кН}$ .



### Задачи для самостоятельного решения:

- Вагон массой 20 т, движущийся со скоростью 0,3 м/с. догоняет вагон массой 30 т, движущийся со скоростью 0,2 м/с. Если соударение неупругое, какова скорость вагонов после соударения? ( $v = 0,24 \text{ м/с}$ )
- Какую работу совершает человек при поднятии груза массой 2 кг на высоту 1 м с ускорением  $3 \text{ м/с}^2$ ?
- Какова кинетическая энергия космического корабля при движении по орбите со скоростью 7,8 км/с, если масса корабля 6,6 т? ( $E_k = 200 \text{ ГДж}$ )
- Найти потенциальную и кинетическую энергию тела массой 3 кг, падающего свободно с высоты 5 м, на расстоянии 2 м от поверхности Земли. ( $E_n = 60 \text{ Дж}$ ;  $E_k = 90 \text{ Дж}$ )
- С какой начальной скоростью  $v_0$  надо бросить вниз мяч с высоты  $h$ , чтобы он подпрыгнул на высоту  $2h$ ? Считать удар абсолютно упругим.  $v_0 = \sqrt{2gh}$ .
- Неупругие шары массами 1 и 2 кг движутся навстречу друг другу со скоростями соответственно 1 и 2 м/с. Найти изменение кинетической энергии после удара. ( $\Delta E_k = 3 \text{ Дж}$ )

### Тестовые вопросы

- Универсальной мерой различных движений и взаимодействий является...  
 А. Энергия. В. Потенциальная энергия.  
 С. Кинетическая энергия. Д. Электрическая энергия.  
 Е. Тепловая энергия.
- Отношение совершенной работы к промежутку времени, за который она совершена, называется...  
 А. Механическая работа. В. Мощность.  
 С. Энергия. Д. Количество теплоты.  
 Е. Коэффициент полезного действия.
- Какова единица энергии в СИ?  
 А. Ватт. В. Джоуль. С. Колория.  
 Д. Н · м. Е. Правильные ответы В и Д.
- Два неупругих тела, массы которых 2 и 6 кг, движутся навстречу друг другу со скоростями 2 м/с каждое. Определите модуль скорости каждого из этих тел после удара.  
 А. 2 м/с. В. 4 м/с. С. 0,5 м/с. Д. 1 м/с. Е. 0.

### Основные выводы

**Закон сохранения импульса:** импульс замкнутой системы сохраняется, т. е. не меняется со временем:  $\vec{P} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = \text{const}$ .

**Энергия** — это универсальная мера различных форм движения и взаимодействия. Единица энергии в СИ — 1 Дж.

**Механической работой** называют величину, равную скалярному произведению силы на перемещение, совершенное под действием этой силы, т. е.  $A = (\vec{F} \cdot \vec{S}) = F \cdot S \cdot \cos \alpha$ . Единица работы в СИ — 1 Дж.

**Мощностью** называют величину, равную отношению работы к промежутку времени, за которое она была совершена:  $N = \frac{A}{t}$ . Единица мощности в СИ — 1 Вт.

**Кинетической энергией** системы называют энергию, приобретенную телом в результате механического движения:

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

**Потенциальная энергия** тела на высоте  $h$  от поверхности Земли  $E_n = mgh = Ph$ .

**Полная механическая энергия** сохраняется, т. е.  $E = E_k + E_n = \text{const}$ .



Мы наблюдаем, как на Землю падает брошенное вверх тело, оторванное от дерева яблоко, подстрелянная птица. Возникает вопрос, почему так происходит. Вместе с этим, почему естественный спутник Земли Луна не удаляется от Земли? Подобные вопросы задавали люди много лет назад и в результате непрерывных изысканий пришли к определенным заключениям. Логически обобщить эти заключения сумел английский физик И. Ньютон.



### § 18. Закон всемирного тяготения

**Содержание:** закон всемирного тяготения; физический смысл гравитационной постоянной; понятие гравитационной массы.

**Закон всемирного тяготения.** Две любые материальные точки притягиваются друг к другу силой пропорционально произведению их масс и обратно пропорционально квадрату расстояния между ними. Эта сила называется *гравитационной* (притяжение). Сила притяжения направлена по прямой, проходящей через две материальные точки:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (18.1)$$

где  $m_1, m_2$  — массы материальных точек,  $r$  — расстояние между ними,  $G$  — гравитационная постоянная.

Закон всемирного тяготения справедлив для тел, которые можно считать материальными точками. Другими словами, размеры тел очень малы по сравнению с расстояниями между ними.

**Физический смысл гравитационной постоянной.** Для определения физического смысла гравитационной постоянной из (18.1) найдем  $G$ :

$$G = \frac{F \cdot r^2}{m_1 \cdot m_2}. \quad (18.2)$$

Если возьмем  $r = 1$  м,  $m_1 = m_2 = 1$  кг, то увидим, что  $G$  численно будет равна силе притяжения  $F$ :

$$G = F \frac{\text{м}^2}{\text{кг}^2}.$$

Значит, гравитационная постоянная  $G$  равна силе притяжения между двумя материальными точками массой 1 кг каждая на

расстоянии 1 м. Человеком, первым определившим существование силы притяжения между телами на Земле и значение гравитационной постоянной, считается английский физик *Г. Кавендиш*.

В настоящее время берется следующее численное значение гравитационной постоянной:

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



Г. Кавендиш  
(1731 — 1810)

**Масса в качестве меры гравитации (притяжения).** Мы определили, что масса является мерой инертности тела. В выражении (18.1) она проявляется в качестве меры притяжения, т. е. если массы тел будут большими, сила притяжения будет большой и наоборот. Массу тела, определенного через силу взаимного притяжения, называют *гравитационной массой*. Поэтому масса является одной из основных характеристик материи, определяющей ее инерционные и гравитационные свойства. В настоящее время доказано, что инерционная и гравитационная массы равны друг другу. Поэтому целесообразно пользоваться кратким выражением *масса*.



### Вопросы для самопроверки

1. Почему оторвавшееся от дерева яблоко падает на Землю?
2. Сформулируйте закон всемирного тяготения.
3. Приведите пять примеров, иллюстрирующих закон всемирного тяготения.
4. Выполняется ли закон всемирного тяготения для любых тел?
5. В чем заключается физический смысл гравитационной постоянной?
6. Кто первым определил гравитационную постоянную?
7. Дайте определение понятию гравитационной массы.
8. Равны ли инертная и гравитационная массы?



### § 19. Поле притяжения. Сила тяжести и вес. Невесомость

**Содержание:** поле притяжения и его характеристики; сила тяжести; вес тела; возрастание и уменьшение веса; невесомость.

**Поле притяжения и его характеристики.** Закон всемирного тяготения показывает зависимость силы притяжения от массы тел и расстояния между ними, но не может показать, как это действие осуществляется. Сила притяжения абсолютно не зависит от среды, в которой находятся взаимодействующие тела, даже существует в вакууме. Тогда возникает вопрос, как осуществляется

гравитационное действие тел. Как показывают эксперименты, это действие осуществляется через поле притяжения или гравитационное поле. В соответствии с этой идеей вокруг любого тела существует гравитационное поле. Мы это поле не видим, фиксируем их существование при помощи приборов (опыт Кавендиша), чувствуем его действие, т. е. притяжение к Земле. Гравитационное действие существует во всех средах и действует на все тела. По мере удаления от тела его действие уменьшается. Гравитационное действие создается телами и является одним из видов существования материи. Его основное свойство состоит в том, что на тело массой  $m$ , введенное в гравитационное поле, действует сила притяжения

$$\vec{F} = m\vec{g}, \quad (19.1)$$

где  $\vec{g}$  называют напряженностью гравитационного поля, она определяется силой, действующей на единичную массу со стороны поля и направление ее совпадает с направлением силы.

Следует отметить, что гравитационное поле — потенциальное поле, сила в нем (сила тяжести) — консервативная сила.

**Сила тяжести.** Как было отмечено выше, вокруг Земли тоже существует поле притяжения и на любое тело, введенное в него, действует сила тяжести  $\vec{P}$ . По второму закону Ньютона под действием этой силы тело приобретает ускорение  $g$ . Значит, на любое тело массой  $m$ , введенное в систему отсчета и связанное с Землей, действует сила тяжести

$$\vec{P} = m\vec{g}, \quad (19.2)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения, его значение равно  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Если мы не будем учитывать вращение Земли вокруг своей оси, на поверхности Земли сила тяжести и сила притяжения будут равны, т. е.

$$P = mg = F = G \frac{mM}{R^2},$$

где  $M$  — масса Земли,  $R$  — расстояние между центрами тела и Земли.

Если тело находится на высоте  $h$  от поверхности Земли, то

$$P = G \frac{mM}{(R_0 + h)^2}, \quad (19.4)$$

где  $R_0$  — радиус Земли. Значит, по мере удаления от поверхности Земли, сила тяжести будет уменьшаться.

**Вес тела.** Вес тела — это сила, возникающая вследствие его притяжения Землей и оказывающая давление на опору или подвес, удерживающий его от свободного падения.

Вес тела проявляется, когда оно движется с ускорением, отличным от ускорения свободного падения, т. е. когда на него кроме силы тяжести действуют еще и другие силы. Во всех других случаях он равен силе тяжести.

**Состояние невесомости.** Состоянием невесомости тела называется состояние, когда тело движется только под действием силы тяжести. Таким образом, в системе отсчета, связанной с Землей, сила тяжести действует постоянно, вес же проявляется, когда на тело действуют кроме силы тяжести еще и другие силы. Под действием этих сил тело начинает двигаться с ускорением  $\vec{a}$ , не равным ускорению  $\vec{g}$ . Значит, если в поле притяжения Земли тело движется с ускорением  $\vec{a}$ , на него кроме силы тяжести  $\vec{P}$  действует еще и другая сила  $\vec{N}$ . По второму закону Ньютона, тело именно под действием суммы этих сил приобретает ускорение  $\vec{a}$ :

$$\vec{N} + \vec{P} = m\vec{a}. \quad (19.5)$$

Из этого выражения вес тела

$$\vec{P}' = -\vec{N} = \vec{P} - m\vec{a} = m\vec{g} - m\vec{a} = m(\vec{g} - \vec{a}). \quad (19.6)$$

Если тело не движется или движется прямолинейно и равномерно, то  $\vec{a} = 0$  и

$$\vec{P}' = m\vec{g}. \quad (19.7)$$

Если тело движется в поле силы тяжести, тогда  $\vec{a} = \vec{g}$  и

$$\vec{P}' = 0, \quad (19.8)$$

т. е. тело будет в состоянии невесомости (рис. 27). В космосе для свободно движущихся тел  $g = 0$  и говорят, что они находятся в состоянии невесомости.

**Уменьшение и увеличение веса тела.** Проанализируем выражение, написанное для веса тела (19.6):

$$\vec{P}' = m(\vec{g} - \vec{a}).$$

В скобке стоит векторное вычитание ускорения свободного падения  $\vec{g}$  и ускорения тела  $\vec{a}$ . Значит, при  $\vec{a} \neq 0$  начинает проявляться вес тела и изменя-

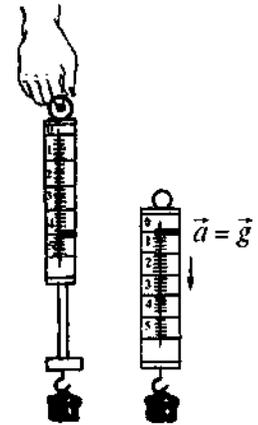


Рис. 27

ется на  $m\bar{a}$ , т. е. вес будет уменьшаться. Если тело будет двигаться с ускорением в направлении  $g$  (т.е. вниз), его вес уменьшится на  $m\bar{a}$ .

Человек, спускающийся на лифте в начальный момент, когда лифт движется с ускорением, именно из-за уменьшения веса почувствует себя облегченным. Теперь рассмотрим случай, когда направление ускорения  $\bar{a}$  противоположно направлению ускорения свободного падения  $\bar{g}$ . В этом случае значение  $\bar{a}$  складывается с  $\bar{g}$ , т.е. будет

$$\bar{P}' = m(\bar{g} + \bar{a}).$$

Значит, начиная с  $a \neq 0$ , вес тела увеличится на  $m\bar{a}$ , т. е. наблюдается увеличение веса.

Человек, поднимающийся на лифте вверх, в начальный момент, когда лифт начинает двигаться с ускорением, именно из-за увеличения веса чувствует себя утяжеленным.



### Вопросы для самопроверки

1. Как осуществляется притяжение тел? 2. Зависит ли сила притяжения от среды, в которой находятся тела? 3. Где образуется поле притяжения? 4. Реально ли поле притяжения? 5. Как определяется напряженность поля притяжения? 6. Какое поле является полем притяжения? 7. Как определяется сила тяжести? 8. В чем причина существования ускорения свободного падения? 9. При каких условиях будут равны силы тяжести и тяготения? 10. Зависит ли сила тяжести от высоты? 11. Как определяется вес тела? 12. Когда проявляется вес тела? 13. Какое состояние называется состоянием невесомости тела? 14. Будет ли в состоянии невесомости тело, свободно двигающееся в космосе? 15. Каким будет вес тела, двигающегося с ускорением вниз? 16. А вес тела, двигающегося с ускорением вверх?



### § 20. Космическая скорость

Содержание: понятие о космических скоростях; первая, вторая и третья космические скорости.

**Космические скорости.** Если какое-то тело подбросить с поверхности Земли вверх, то оно поднимется на определенную высоту и упадет обратно. Если бросить его под острым углом к поверхности Земли, то тело поднимется на некоторую высоту, пролетит определенное расстояние и упадет. Если теперь будем увеличивать скорость тела, то достигнем такого ее значения, начиная с которого тело начнет двигаться вокруг Земли по определенной круговой орбите (рис. 28). Начи-

ная с этой скорости, скорости, сообщаемые телу, называются космическими. Перед тем как вывести тело в космос в зависимости от поставленной задачи, ему придают различные начальные скорости.

**Первая космическая скорость.** *Первой космической скоростью* называют наименьшую скорость, которую необходимо сообщить телу, чтобы оно вращалось вокруг Земли по круговой орбите, т. е. стало искусственным спутником Земли.

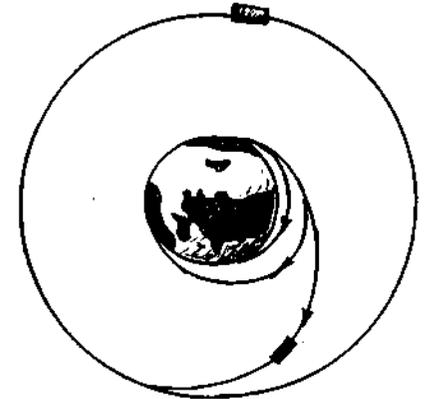


Рис. 28

Значит, тело равномерно движется вокруг Земли по кругу радиусом  $R$ . На него действует два ускорения: ускорение свободного падения  $g$  и нормальное ускорение  $\frac{v^2}{R}$  при круговом движении. Из-за равенства этих ускорений тело может двигаться равномерно по круговой орбите:

$$\frac{v^2}{R} = g, \quad (20.1)$$

отсюда

$$v_1 = \sqrt{gR}. \quad (20.2)$$

Получаем первую космическую скорость. Считая, что тело находится не очень высоко от поверхности Земли, в выражение (20.2) вместо  $R$  подставим значение радиуса Земли и получим значение ускорения свободного падения:

$$v_1 = 7,9 \cdot 10^3 \text{ м/с} = 7,9 \text{ км/с}.$$

**Вторая космическая скорость.** *Второй космической скоростью* называют наименьшую скорость, которую необходимо сообщить телу, чтобы оно преодолело поле притяжения Земли и вращалось вокруг Солнца по параболической орбите, т. е. стало искусственным спутником Солнца. Вторая космическая скорость определяется при помощи следующего выражения:

$$v_2 = \sqrt{2gR} = 11,2 \cdot 10^3 \text{ м/с} = 11,2 \text{ км/с}.$$

**Третья космическая скорость.** *Третьей космической скоростью* называют наименьшую скорость, которую необходимо

сообщить телу на Земле, чтобы оно преодолело поле притяжения Солнца и покинуло Солнечную систему.

Значение третьей космической скорости равно

$$v_3 = 16,7 \cdot 10^3 \text{ м/с} = 16,7 \text{ км/с.}$$



### Вопросы для самопроверки

1. Какие скорости называют космическими? 2. Какая скорость называется первой космической скоростью? 3. Как определяется первая космическая скорость? 4. Чему равна первая космическая скорость? 5. Какая скорость называется второй космической скоростью? 6. Чему равна вторая космическая скорость? 7. Какая скорость называется третьей космической скоростью? 8. Чему равна третья космическая скорость?



### Образцы решения задач

**Задача 1.** Определить напряженность  $g$  поля притяжения на высоте  $h = 1000$  км от поверхности Земли. Считать известным радиус Земли и ускорение свободного падения.

**Дано:**

$$h = 1000 \text{ км} = 10^6 \text{ м};$$

$$g_3 = 9,8 \text{ м/с}^2;$$

$$R_3 = 6,37 \cdot 10^6 \text{ м.}$$

$g = ?$

**Решение.** Напряженность поля притяжения Земли определяется выражением

$g = \frac{F}{m}$ , где  $m$  — масса испытуемого тела на высоте  $h$  от поверхности Земли. Сила притяжения между этим телом и Землей

$$F = G \frac{mM_3}{(R_3 + h)^2}.$$

Подставим данные в выражение, найденное для силы:

$$g = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2} = \left( G \frac{M_3}{R_3} \right) \frac{R_3^2}{(R_3 + h)^2} = g_3 \frac{R_3^2}{(R_3 + h)^2}.$$

Здесь было учтено, что  $g_3 = G \frac{M_3}{R_3^2}$ .

При помощи данных

$$g = 9,8 \cdot \frac{(6,37 \cdot 10^6)^2}{(6,37 \cdot 10^6 + 10^6)^2} \frac{\text{Н}}{\text{кг}} = 7,3 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}$$

$$\text{Ответ: } g = 7,3 \frac{\text{Н}}{\text{кг}}.$$

**Задача 2.** Радиус Земли больше радиуса Луны в  $n = 3,66$  раза, а плотность Земли больше плотности Луны в  $k = 1,66$  раза. Если считать, что ускорение свободного падения  $g$  на поверхности Земли известно, найти ускорение свободного падения  $g_L$  на поверхности Луны.

**Дано:**

$$n = R_3/R_L = 3,66;$$

$$k = \rho_3/\rho_L = 1,66;$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2.$$

$g_L = ?$

**Решение.** Известно, что ускорение свободного падения на поверхности Земли определяется выражением

$$g = G \frac{M_3}{R_3^2}.$$

Ускорение свободного падения на поверхности Луны определяется выражением

$$g_L = G \frac{M_L}{R_L^2}.$$

Если полученные выражения почленно поделить и учесть, что  $M = V \cdot \rho = 4/3 \cdot \pi R^3 \cdot \rho$ , то

$$\frac{g_L}{g_3} = \frac{M_L}{M_3} \frac{R_3^2}{R_L^2} = \frac{\frac{4}{3} \pi R_L^3 \rho_L}{\frac{4}{3} \pi R_3^3 \rho_3} \cdot \frac{R_3^2}{R_L^2} = \frac{1}{\left(\frac{R_3}{R_L}\right) \left(\frac{\rho_3}{\rho_L}\right)} = \frac{1}{n \cdot k}.$$

отсюда

$$g_L = \frac{g}{n \cdot k}.$$

При помощи данных находим:

$$g_L = \frac{9,8}{3,66 \cdot 1,66} \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 1,61 \text{ м/с}^2.$$

Ответ:  $g_L = 1,61 \text{ м/с}^2$ .



### Задачи для самостоятельного решения

1. На каком расстоянии от поверхности Земли сила притяжения к Земле космического корабля будет в 100 меньше, чем сила притяжения на поверхности Земли? ( $h = 9R_3$ )

2. Чему равно ускорение свободного падения на высоте, равной половине радиуса Земли? ( $g_h = 4,4 \text{ м/с}^2$ )

3. Лифт Останкинской телевизионной башни разгоняется до скорости 7 м/с в течение 15 с. Столько же времени занимает и остановка лифта. На сколько изменяется вес человека массой 80 кг в начале и в конце движения лифта? ( $\Delta P = \pm 37 \text{ Н}$ )

4. Вычислите первую и вторую космические скорости вблизи поверхности Луны. ( $v_1 = 1,68$  км/с;  $v_2 = 2,37$  км/с)

### Тестовые вопросы

1. Из данных уравнений найдите уравнение закона всемирного тяготения.

- A.  $F = \frac{Q_1 Q_2}{R_2}$ .                      B.  $F = G \frac{M_1 M_2}{R_2}$ .                      C.  $F = \mu Mg$ .  
 D.  $F = mv^2/R$ .                      E.  $F = mg$ .

2. Масса, определяемая взаимным притяжением тел, называется ... массой.

- A. Инертной.                      B. Гравитационной.  
 C. Молекулярной.                      D. Большой.  
 E. Маленькой.

3. Как называется сила, возникающая вследствие притяжения тела к Земле и оказывающее давление на опору или подвес, удерживающий его от свободного падения?

- A. Вес.                      B. Масса.                      C. Свободное падение.  
 D. Сила тяжести.                      E. Ускорение.

4. От чего зависит скорость ракеты?

- A. От массы ракеты.  
 B. От массы разогретого газа.  
 C. От скорости вылетающего газа.  
 D. От скорости оболочки.  
 E. Правильные ответы B и C.

5. Среди данных величин найдите численное значение гравитационной постоянной.

- A.  $6,63 \cdot 10^{-13} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ .                      B.  $6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$ .  
 C.  $1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ .                      D.  $6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ .  
 E. Правильного ответа нет.

### Основные выводы

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

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

Гравитационная постоянная  $G$  численно равна силе притяжения между двумя материальными точками массой 1 кг каждая на расстоянии 1 м.

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

На каждое тело массой  $m$  действует сила тяжести  $\vec{P} = m\vec{g}$ .

**Вес тела** — это сила, возникающая вследствие притяжения тела к Земле и оказывающая давление на опору или подвес, удерживающий его от свободного падения.

Состоянием **невесомости** тела называется состояние его движения только под действием силы тяжести.

Первая космическая скорость:  $v_1 = \sqrt{gR} = 7,9$  км/с.

Вторая космическая скорость:  $v_2 = \sqrt{2gR} = 11,2$  км/с.

Третья космическая скорость:  $v_3 = 16,7$  км/с.



## ГЛАВА 5. МЕХАНИКА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Одно из широко применяемых в механике понятий является понятие абсолютно твердого тела.

*Абсолютно твердым телом* называется тело, которое абсолютно не деформируется, и при любых условиях расстояние между частицами тела остается неизменным.

Мы выше размышляли о значении изучения методом сравнения. Нас хотят познакомить с незнакомым человеком, которого нет рядом с нами. Тогда его сравнивают с знакомыми нам людьми. В результате о незнакомом человеке при помощи сравнения будем иметь определенное представление или знания. Также, решая какую-то физическую задачу, используем результаты уже решенной задачи, т. е. решим сравнивая — это намного облегчит нашу работу. Теперь динамику вращательного движения твердого тела будем изучать, сравнивая ее с динамикой поступательного движения.



### § 21. Момент инерции и силы. Уравнение динамики вращательного движения твердого тела

**Содержание:** вращательное движение; сравнение кинематики вращательного и поступательного движения; моменты инерции и силы; уравнение динамики вращательного движения.

**Вращательное движение.** Мы знаем, что при поступательном движении прямая линия, проведенная через каждую точку движущегося тела в процессе движения, остается параллельной первоначальному состоянию (рис. 1).

При вращательном движении все точки тела движутся по траекториям, состоящим из окружностей с центром, проходящим через ось вращения (рис. 2). Расстояние из рассматриваемой точки до центра вращения обозначается буквой  $R$  и называется *радиусом-вектором*, или радиусом. Именно эта величина играет важную роль при сравнении величин механики поступательного и вращательного движения.

Таблица 1

Сравнение величин кинематики поступательного и вращательного движения

Поступательное движение	Обозначение	Вращательное движение	Обозначение	Отношение между движениями	
Путь	$s$	Угол поворота	$\varphi$	$s = R\varphi$	$\varphi = s/R$
Линейная скорость	$v = \frac{ds}{dt}$	Угловая скорость	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$	$v = R\omega$	$\omega = v/R$
Линейное ускорение (тангенциальное)	$a_t = \frac{dv}{dt}$	Угловое ускорение	$\epsilon = \frac{d\omega}{dt}$	$a_t = R\epsilon$	$\epsilon = \frac{a_t}{R}$

Таким образом, соответствующие величины, характеризующие поступательное и вращательное движение, связаны через радиус  $R$ .

**Момент инерции.** Чтобы отличать основные величины динамики вращательного движения от величин динамики поступательного движения, будем к ним добавлять слово *момент*. Одним из основных понятий, введенных в динамику поступательного движения, было понятие массы тела. Масса тела ( $m$ ) — это величина, характеризующая его инертность (существование инерции). При вращательном движении масса не может выполнять эту функцию. Поэтому вместо него пользуются моментом инерции, который вобрал в себя расстояния ( $r_i$ ) от точек, образующих тело, до оси вращения и выполняющих ту же функцию, что и масса при поступательном движении. (Понятие момент массы не применяется).

**Моментом инерции** тела относительно оси вращения называют физическую величину, равную сумме произведений массы каждой материальной точки тела на квадрат расстояния до оси вращения, т. е.

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2, \quad (21.1)$$

где  $m_i$  — масса,  $i$ -точки,  $r_i$  — расстояние от точки до оси вращения. Момент инерции, как и масса, — величина скалярная. Единица в СИ —  $1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ :

$$[J] = [m] [r^2] = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м}^2 = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

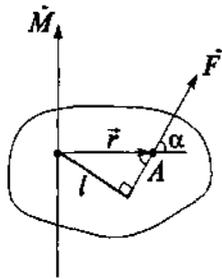


Рис. 29

В зависимости от формы тела и места, где проходит ось вращения, моменты инерции бывают разными.

**Момент силы.** Сила — векторная величина и является мерой механического действия тел и полей, в результате чего тело приобретает известное ускорение. Во вращательном же движении сила не может выполнить эту функцию. Например, какую бы силу мы ни приложили к оси вращения двери, мы не сможем привести ее в движение. Значит,

при таком движении имеет значение не только сила, но и место приложения силы от оси вращения.

Функцию, которую выполняет при поступательном движении сила, во вращательном движении выполняет момент силы.

Моментом силы относительно неподвижной оси называют физическую величину, определяемую векторным произведением радиуса-вектора  $\vec{r}$ , проведенного от оси вращения до точки приложения силы на силу  $\vec{F}$ , т. е.

$$\vec{M} = [\vec{r} \cdot \vec{F}], \quad (21.2)$$

где  $\vec{r}$  — радиус-вектор, проведенный от оси вращения до точки приложения силы (рис. 29).

Модуль момента силы

$$M = F \cdot r \cdot \sin \alpha = F \cdot l, \quad (21.3)$$

где  $l$  — плечо силы, кратчайшее расстояние от оси вращения до точки приложения силы,  $\alpha$  — угол между силой  $\vec{F}$  и радиусом-вектором  $\vec{r}$ :  $r \sin \alpha = l$ .

Момент силы — векторная величина. Единица его в СИ —  $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ :

$$[M] = [F][l] = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

**Уравнение динамики вращательного движения.** Теперь на основе уравнения динамики поступательного движения  $F = ma$  при помощи соответствующих величин напишем уравнение динамики вращательного движения.

Будем считать, что ось вращения проходит через центр инерции:

$$M = J \cdot \varepsilon = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (21.4)$$

или в векторной форме

$$\vec{M} = J \ddot{\varepsilon}. \quad (21.5)$$



### Вопросы для самопроверки

1. Какое тело называют абсолютно твердым телом?
2. На сравнении с каким разделом физики основывается изучение динамики вращательного движения твердого тела?
3. Как определяется радиус при вращательном движении?
4. Какая величина при вращательном движении выполняет функцию массы, которую она выполняет при поступательном движении?
5. Как определяется момент инерции и его единица?
6. Как определяется момент силы?
7. Какая величина во вращательном движении выполняет функцию силы, которую она выполняет в поступательном движении?
8. Почему сила во вращательном движении не может выполнить функцию, которую она выполняет при поступательном движении?
9. Какую величину называют плечом силы?
10. Каково основное уравнение динамики вращательного движения?

## § 22. Момент импульса и закон его сохранения

Содержание: момент импульса; связь между моментом импульса и характеристиками кинематики вращательного движения; основной закон динамики вращательного движения; закон сохранения момента импульса; кинетическая энергия тела, совершающего вращательное движение; связь между характеристиками динамики поступательного и вращательного движения.

**Момент импульса.** Функцию импульса во вращательном движении выполняет момент импульса. Он, как и импульс, является векторной величиной и обозначается буквой  $\vec{L}$ . Моментом импульса (количества движения) материальной точки  $A$  относительно неподвижной точки  $O$  называют физическую величину, определяемую следующим векторным произведением (рис. 30):

$$\vec{L} = [\vec{r} \cdot \vec{p}] = [\vec{r} \cdot m\vec{v}]. \quad (22.1)$$

Модуль момента импульса:

$$L = r \cdot p \cdot \sin \alpha = mvr \sin \alpha = p \cdot l, \quad (22.2)$$

где  $\vec{r}$  — радиус-вектор от оси вращения до точки приложения импульса  $A$ ;  $r \sin \alpha = l$ ,  $l = p$  — плечо вектора относительно оси  $O$ ;  $\alpha$  — угол между векторами  $\vec{r}$  и  $\vec{p}$  (рис. 30). Единица момента импульса в СИ —  $1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$ :

$$[L] = [r] \cdot [p] = 1 \text{ м} \cdot 1 \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{с} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}.$$

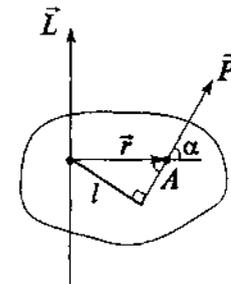


Рис. 30

Связь между моментом импульса и характеристиками кинематики вращательного движения. На основании подобия характеристик поступательного и вращательного движения для момента импульса напишем следующее выражение:

$$L = J \cdot \omega \quad (22.3)$$

Здесь используется выражение  $p = mv$ , вместо  $p$  подставили  $L$ , вместо  $m$  —  $J$  и вместо  $v$  —  $\omega$ . Также при помощи выражения основного закона динамики поступательного движения  $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$  напишем закон динамики вращательного движения твердого тела:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}. \quad (22.4)$$

**Закон сохранения момента импульса.** Если система замкнутая, то в ней момент внешних сил будет равен нулю, т.е.  $\vec{M} = 0$ . В этом случае (22.4) примет следующий вид:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = 0.$$

Если учесть, что только производная от постоянного числа равна нулю, то

$$\vec{L} = \text{const}. \quad (22.5)$$

Уравнение (22.5) является законом сохранения момента импульса. В замкнутой системе момент импульса сохраняется, т.е. не изменяется с течением времени. Как было отмечено ранее, закон сохранения момента импульса является одним из фундаментальных законов природы и является следствием изотропности пространства.

**Кинетическая энергия тела, совершающего вращательное движение.** Кинетическую энергию тела, совершающего вращательное движение, найдем из выражения  $W_k = \frac{mv^2}{2}$ , т.е. заменяя соответствующие величины, получим

$$W_k = \frac{J\omega^2}{2}. \quad (22.6)$$

Если тело катится, т.е. совершает и поступательное и вращательное движение относительно центра массы, то его полная кинетическая энергия будет равна сумме кинетической энергии поступательного, а также кинетической энергии вращательного движения:

$$W_k = \frac{mv_c^2}{2} + \frac{J_c\omega^2}{2},$$

где  $v_c$  — скорость центра массы тела,  $J_c$  — момент инерции тела относительно центра массы.

Связь между характеристиками динамики поступательного и вращательного движения

Поступательное движение	Вращательное движение
Перемещение и путь: $\vec{r}$ и $s$	Угол $\varphi, \bar{\varphi}$
Скорость $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}, v = \frac{ds}{dt}$	Угловая скорость $\bar{\omega} = \frac{d\varphi}{dt}$
Ускорение $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$	Угловое ускорение $\bar{\epsilon} = \frac{d\bar{\omega}}{dt}$
Масса $m$	Момент инерции $J = mr^2$
Сила $\vec{F}$	Момент силы $\vec{M} = [\vec{r}\vec{F}]$
Импульс $\vec{P} = m\vec{v}$	Момент импульса $\vec{L} = J\bar{\omega}$
$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$	Основной закон динамики $\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}$
Работа $dA = FdS$	Работа $dA = M d\varphi$
Кинетическая энергия $\frac{mv^2}{2}$	Кинетическая энергия $\frac{J\omega^2}{2}$



### Вопросы для самопроверки

1. Какая величина во вращательном движении выполняет функцию, которую в поступательном движении выполняет импульс? 2. Как определяется момент импульса и какова его единица? 3. Какая имеется связь между моментом импульса и характеристиками кинематики вращательного движения? 4. Каков основной закон динамики вращательного движения? 5. Что вы знаете о законе сохранения момента импульса? 6. Как найти кинетическую энергию тела, совершающего вращательное движение? 7. Как найти кинетическую энергию катящегося тела? 8. Сравните законы динамики поступательного и вращательного движения.



### § 23. Деформация твердого тела

Содержание: деформация; виды деформаций; относительная деформация; закон Гука для деформации твердого тела.

**Деформация. Виды деформаций.** Мы до сих пор пользовались понятием абсолютно твердого тела. Но в природе не существует абсолютно твердого тела и все тела в большей или меньшей степени деформируются.

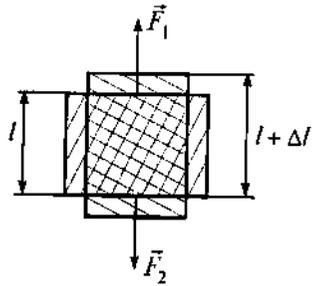


Рис. 31

Деформацией твердого тела называют изменение формы и размеров тела под действием внешней силы.

Если после прекращения действия внешней силы тело возвращается в свое прежнее состояние, то такую деформацию называют *упругой деформацией*.

Примером упругой деформации может быть изгиб линейки, растяжение резинки и др.

Деформацию, которая не исчезает после прекращения действия внешних сил, называют *пластической (остаточной) деформацией*. Примером такой деформации является поломка стекла и др.

Если взять в общем все деформации реальных тел, их можно считать пластическими. Но если остаточная деформация слишком мала, то ею можно пренебречь и считать деформацию упругой.

**Относительная деформация.** Любые деформации можно свести к двум видам: растяжению и сдвигу. Познакомимся с этими видами деформации.

К однородному стержню длиной  $L$  приложены силы  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ . Так как  $F_1 = F_2 = F$ , будем считать, что приложена только сила  $F$ . В результате стержень удлинится на  $\Delta l$ . Обычно при растяжении стержня  $\Delta l$  берется с положительным знаком, а при сжатии — с отрицательным (рис. 31). *Напряжением* называют величину, численно равную силе, приходящейся на единицу площади сечения тела:

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (23.1)$$

Для количественной характеристики степени деформации было введено понятие относительной деформации.

Продольная относительная деформация (растяжение) определяется выражением

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (23.2)$$

поперечная относительная деформация (сжатие) выражением

$$\epsilon' = \frac{\Delta d}{d}. \quad (23.3)$$

Между ними существует следующее отношение:

$$\epsilon' = -\mu \epsilon,$$

где  $\mu$  зависит от свойства вещества и называется коэффициентом Пуассона.

**Закон Гука для деформации твердого тела.** Английский физик Гук для маленьких деформаций определил существование связи между относительным удлинением  $\epsilon$  и  $\sigma$  напряжением:

$$\sigma = E \cdot \epsilon, \\ \epsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \sigma = \alpha \sigma, \quad (23.4)$$

где  $\alpha$  — коэффициент упругости, показывающий упругие свойства вещества. Обратная ему величина  $E$  называется его модулем. Чем больше будет  $E$ , тем меньше будет тело деформироваться:

$$\epsilon = \frac{F}{E \cdot S}.$$

С учетом предыдущего выражения закон Гука можно написать по другому:

$$F = \frac{E \cdot S}{l} \cdot \Delta l = k \cdot \Delta l. \quad (23.5)$$

Величина деформации при упругой деформации прямо пропорциональна деформирующей силе. Здесь  $k$  называется коэффициентом упругости.

Следует отметить, что деформация твердого тела подчиняется закону Гука до определенной границы.



#### Вопросы для самопроверки

1. Что называют деформацией? 2. Какая деформация считается упругой? 3. Какая деформация считается пластической? 4. Какими на практике бывают реальные деформации? 5. Какие бывают виды деформаций? 6. Что называют механическим напряжением? 7. Какие относительные деформации вы знаете? 8. Что такое относительная деформация сжатия? 9. Сформулируйте закон Гука для деформации твердого тела. 10. Что называют коэффициентом упругости?



#### § 24. Равновесие твердого тела. Элементы статики

Содержание: равновесие твердого тела; равновесие тел, не совершающих вращательное движение и совершающих вращательное движение.

**Равновесием твердого тела** называют состояние, при котором все точки тела относительно системы отсчета находятся в покое.

**Равновесие тела, не совершающего вращательное движение.** Нам известно, что сила или силы, действующие на тело по второму закону Ньютона, должны сообщить ему определенное ускорение. Когда эти силы не могут сообщить телу ускорение?

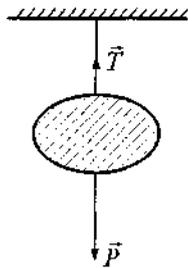


Рис. 32

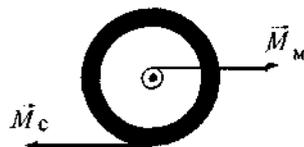


Рис. 33

Если сумма этих сил будет равна нулю, только тогда тела сохраняют свое поступательное прямолинейное равномерное движение или состояние покоя.

Тело, не совершающее вращательного движения, находится в состоянии равновесия только тогда, когда векторная сумма приложенных на него сил будет равна нулю:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0.$$

Векторная сумма силы тяжести, действующая на подвешенное тело, и сила упругости нити равна нулю (рис. 32):

$$\vec{P} + \vec{F} = 0.$$

**Равновесие тела, совершающего вращательное движение.** Пусть тело совершает вращательное движение относительно неподвижной оси. Теперь рассмотрим условия состояния покоя или равномерного движения этого тела. Если воспользуемся сравнением из § 21, используя вместо силы в поступательном движении момент силы во вращательном движении, перепишем правило из предыдущего параграфа.

**Тело, совершающее вращательное движение вокруг неподвижной оси, будет в состоянии равновесия, когда векторная сумма всех моментов сил, приложенных к нему, будет равна нулю:**

$$\vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \dots + \vec{M}_n = 0.$$

Колесо находится в состоянии покоя под действием момента силы тяги мотора  $\vec{M}_m$  и момента силы сопротивления  $\vec{M}_c$  (рис. 33).



#### Вопросы для самопроверки

1. Что изучает раздел статики? 2. Какое состояние называется равновесием твердого тела? 3. Когда тело, не совершающее вращательное движение, будет в состоянии равновесия? 4. При каких условиях будет соблюдаться равновесие подвешенного тела? 5. При каких условиях тело, совершающее вращательное движение, будет в состоянии равновесия?



#### Образцы решения задач

**Задача 1.** Тело начало вращательное движение и через 6 с угловая скорость стала равной  $3 \text{ с}^{-1}$ . Чему равен момент инерции тела, если действующий момент силы равен  $12 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ?

**Дано:**

$$M = 12 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\Delta t = 6 \text{ с};$$

$$\omega_0 = 0;$$

$$\omega = 3 \text{ с}^{-1}$$

$$J = ?$$

**Решение:** Напишем основное уравнение динамики вращательного движения:

$$M = J \cdot \epsilon.$$

И из него найдем момент инерции:

$$J = \frac{M}{\epsilon},$$

где  $\epsilon$  — угловое ускорение тела. Согласно определению углового ускорения

$$\epsilon = \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta t}.$$

Тогда выражение для момента инерции примет вид:

$$J = \frac{M \cdot \Delta t}{\omega - \omega_0}.$$

Подставив численные значения величин, получим

$$J = \frac{12 \cdot 6}{3 - 0} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 = 24 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Ответ:  $J = 24 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

**Задача 2.** Кинетическая энергия вращающегося колеса равна 1 кДж. Под действием постоянного тормозящего момента колесо начало равнозамедленное вращение и после  $N = 80$  вращений остановилось. Найти тормозящий момент силы  $M$ .

**Дано:**

$$E_k = 1 \text{ кДж} = 10^3 \text{ Дж};$$

$$N = 80.$$

$$M = ?$$

**Решение:** Согласно закону сохранения энергии работа постоянного тормозящего момента  $A$  будет равна энергии вращающегося колеса, т. е.

$$A = E_k.$$

Если учтем, что работа постоянного момента равна  $A = M \cdot \varphi$ , то

$$M \cdot \varphi = E_k.$$

Угол поворота до остановки колеса определим следующим образом:

$$\varphi = 2\pi \cdot N.$$

Тогда выражение, найденное для момента силы, примет следующий вид:

$$M = \frac{E_k}{2\pi N}$$

Подставив численные значения величин, получим

$$M = \frac{10}{2 \cdot 3,14 \cdot 80} \text{ Н} \cdot \text{м} = \frac{10}{1,6 \cdot 3,14} \text{ Н} \cdot \text{м} = 1,99 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Ответ:  $M = 1,99 \text{ Н} \cdot \text{м}$



### Задачи для самостоятельного решения

1. Человек, стоящий на стуле Жуковского, поймал рукой мяч массой 0,4 кг, летящий в горизонтальном направлении со скоростью 20 м/с. Траектория мяча проходит на расстоянии 0,8 м от вертикальной оси вращения стула. С какой угловой скоростью будет вращаться человек со стулом, если суммарный момент инерции человека и стула равен  $6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ? ( $\omega = 1,02 \text{ с}^{-1}$ )

2. Определите момент силы, необходимый для остановки в течение 6 с вращающейся лебедки, если радиус лебедки равен 15 см, а частота вращения —  $8 \text{ с}^{-1}$ . Масса лебедки 5 кг и она равномерно распределена по ободку. ( $M = 0,84 \text{ Н} \cdot \text{м}$ )

3. К концам стержня массой 10 кг и длиной 40 см подвешены грузы массами 40 и 10 кг. Где надо подпереть стержень, чтобы он находился в равновесии? ( $l_1 = 10 \text{ см}$ )

4. Сплошной цилиндр массой 10 кг вращается без скольжения со скоростью 10 м/с. Найдите кинетическую энергию цилиндра. ( $E_k = 750 \text{ Дж}$ )

### Тестовые вопросы

1. Среди следующих уравнений найти формулу кинетической энергии тела, совершающую вращательное движение.

A.  $W_k = \frac{J\omega^2}{2}$

B.  $W_k = \frac{mv^2}{2}$

C.  $W_k = mgh$

D.  $W_p = gEd$

E. Правильного ответа нет.

2. ... называют тело, которое абсолютно не деформируется и при любых условиях расстояние между частицами тела остается неизменным.

A. Абсолютно твердым телом. B. Моментом инерции.

C. Моментом силы. D. Поступательным движением.

E. Вращательным движением.

3. Укажите формулу механического напряжения.

A.  $\delta = F/S$

B.  $\delta = E/\epsilon$

C.  $\delta = \Delta l/l$

D.  $\delta = F/l$

E.  $\delta = \Delta d/d$

4. Из приведенных выражений найдите выражение закона Гука.

A.  $\delta = E \cdot \epsilon$

B.  $\epsilon = F/E \cdot S$

C.  $F = k \cdot \Delta l$

D.  $\epsilon = \alpha \cdot \delta$

E. Правильные ответы А и В.

5. Если на медную и стальную проволоки действует одинаковая растягивающая сила, во сколько раз абсолютное удлинение медной проволоки будет больше стальной?

(Длина и поперечное сечение проводов одинаковое)

A. 1,46.

B. 1,56.

C. 1,66.

D. 1,76.

E. 1,12.

6. Какую силу надо приложить, чтобы проволоку длиной 4 см и поперечным сечением  $0,5 \text{ мм}^2$  растянуть на 0,2 мм?

A. 20 Н;

B. 30 Н;

C. 40 Н;

D. 50 Н;

E. 60 Н.

### Основные выводы

*Моментом инерции* тела относительно оси вращения называют физическую величину, равную сумме произведений массы каждой материальной точки тела на квадрат расстояния до оси вращения:

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2. \text{ Единица в СИ—} 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

*Моментом силы* относительно неподвижной оси называют физическую величину, определяемую векторным произведением радиуса-вектора  $\vec{r}$ , проведенного от оси вращения до точки приложения силы на силу  $\vec{F}$ :  $M = [\vec{r} \cdot \vec{F}]$ . Единица в СИ— $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Основной закон динамики вращательного движения:  $\vec{M} = \vec{J}\epsilon$ .

**Закон сохранения момента импульса:**

*В замкнутой системе момент импульса сохраняется, т. е. неизменяется с течением времени:*  $\vec{L} = \text{const}$ .

*Деформацией* твердого тела называют изменение формы и размеров тела под действием внешней силы.



Хотя жидкости и газы некоторыми своими свойствами и отличаются друг от друга, в ряде многих механических явлений их поведение описывается одинаковыми параметрами и идентичными уравнениями. Поэтому равновесие и движение жидкостей и газов, их взаимодействие между собой и обтекаемыми ими твердыми телами рассматриваются совместно.



§ 25. Давление в жидкостях и газах. Законы Паскаля и Архимеда

**С о д е р ж а н и е:** жидкости и газы; давление в жидкостях и газах; закон Паскаля; гидростатическое давление; закон Архимеда.

**Жидкости и газы.** Силы взаимодействия между молекулами газов очень малы, поэтому они постоянно совершают беспорядочное движение и полностью занимают выделенный объем. Объем газа и объем занимаемого им сосуда совпадают.

В отличие от газов молекулы жидкости связаны друг с другом довольно прочно и расстояние между ними фактически не меняется. Поэтому жидкость не сжимается. Молекулы жидкости имеют свойство обмениваться местами. Жидкость принимает форму сосуда, в который ее налили и имеет свойство текучести.

**Давление в жидкостях и газах.** Плотность жидкостей практически не зависит от давления, плотность же газов зависит от давления. В большинстве случаев можно пренебречь сжимаемостью жидкостей и газов и использовать модель несжимаемой жидкости.

Если в покоящуюся жидкость поместить тонкую пластинку, то части жидкости, находящиеся по разные стороны от нее, на каждый ее элемент  $\Delta S$  будут действовать равными по модулю и направленными перпендикулярно площадке  $\Delta S$  силами  $\Delta F$  (рис. 34).

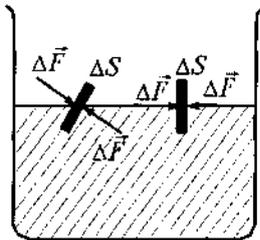


Рис. 34

Давлением жидкости называют физическую величину, определяемую силой, действующей со стороны жидкости на единицу площади нормально к ней:

$$p = \frac{\Delta F}{\Delta S}. \quad (25.1)$$

Единица давления в СИ — паскаль (Па):

$$[p] = \frac{[F]}{[S]} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 1 \text{ Па}.$$

1 Па равен давлению, создаваемому силой 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м<sup>2</sup>.

Прибор, используемый для измерения абсолютного давления, называют *барометром*, а прибор, используемый для измерения давления в закрытых сосудах или другие давления, называют *манометром*.

**Закон Паскаля.** Давление жидкости, находящейся в равновесном состоянии, подчиняется закону Паскаля. В покоящихся жидкостях давление в любом месте во всех направлениях одинаково и по всему объему покоящейся жидкости передается одинаково.

**Гидростатическое давление. Закон Архимеда.** Рассмотрим, как влияет вес жидкости на распределение давления внутри покоящейся несжимаемой жидкости. В состоянии равновесия жидкости давление в горизонтальной плоскости будет одинаковым. Иначе не было бы равновесия. Поэтому в покоящейся жидкости свободная поверхность всегда находится в горизонтальном состоянии. Если жидкость несжимаема, то ее плотность не зависит от давления. Вес столбика жидкости плотностью  $\rho$ , площадью поперечного сечения  $S$  и высотой столбика  $h$  равна

$$P = mg = \rho Vg = \rho gSh,$$

где  $m$  — масса столбика жидкости;  $g$  — ускорение свободного падения;  $V$  — объем столбика жидкости.

Давление на нижнее основание равно:

$$p = \frac{P}{S} = \frac{\rho gSh}{S} = \rho gh. \quad (25.2)$$

Значит, давление на основание жидкости зависит от высоты уровня жидкости. Т. е. давление жидкости на нижний слой будет больше, чем давление на верхний слой, поэтому на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила. Эта сила называется силой Архимеда. *На тело, погруженное в жидкость со стороны этой жидкости действует сила, направленная вверх и равная весу вытесненной телом жидкости:*

$$F_A = \rho_{\text{ж}} gV. \quad (25.3)$$

Вес тела, погруженного в жидкость:

$$P_{\text{ж}} = mg - F_A = \rho_{\text{т}} Vg - \rho_{\text{ж}} Vg = (\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}}) Vg, \quad (25.4)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  — плотность жидкости;  $\rho_{\text{т}}$  — плотность тела;  $V$  — объем тела, погруженного в жидкость;  $\rho_{\text{ж}} g h$  — гидростатическое давление.

Закон Архимеда справедлив и для газов.



### Вопросы для самопроверки

1. Как определяется объем газа? 2. Почему жидкость занимает объем сосуда? 3. Сжимается ли жидкость? 4. Что называют давлением жидкости? 5. Назовите единицу давления. 6. Чем отличаются друг от друга манометр и барометр? 7. Закон Паскаля. 8. Почему свободная поверхность жидкости находится в горизонтальном положении? 9. Что такое гидростатическое давление? 10. Почему погруженное в жидкость тело кажется легким? 11. Что такое сила Архимеда?

## § 26. Неразрывность и уравнение Бернулли

**Содержание:** течение жидкости и поток; уравнение непрерывности; уравнение Бернулли; статическое, динамическое и гидростатическое давление.

**Уравнение неразрывности.** Движение жидкостей называется *течением*, а совокупность частиц движущейся жидкости — *поток*. В местах трубки, где поперечное сечение равно  $S_1$  и  $S_2$ , скорости течения жидкости соответственно будут  $v_1$  и  $v_2$  (рис. 35). В несжимаемой жидкости произведение скорости потока на поперечное сечение потока — постоянная величина, т. е.

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 = \dots = \text{const.} \quad (26.1)$$

Соотношение (26.1) называется уравнением неразрывности для несжимаемой жидкости.

Это уравнение получается из равенства масс жидкостей, протекающих через любое место трубы в единицу времени. ( $m_1 = m_2 = \dots = \text{const.}$ )

**Уравнение Бернулли.** Швейцарский физик Бернулли определил, что для давления текущей жидкости справедливо следующее соотношение:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const.} \quad (26.2)$$

Это уравнение называют уравнением Бернулли. Где  $p$  — статическое давление жидкости, которое возникает в результате силы

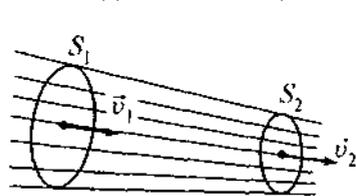


Рис. 35

тяжести,  $\frac{\rho v^2}{2}$  — динамическое давление — результат движения жидкости,  $\rho gh$  — гидростатическое давление,  $\rho$  — плотность жидкости,  $v$  — скорость,  $h$  — высота потока.

Если течение горизонтальное, то (26.2) принимает вид:

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

где  $p = \frac{\rho v^2}{2}$  называется полным давлением.



### Вопросы для самопроверки

1. Что называют течением? 2. Что называют потоком? 3. Каково уравнение неразрывности? 4. Приведите три примера, подтверждающие справедливость уравнения неразрывности. 5. Что такое статическое давление? 6. Что такое динамическое давление? 7. Что такое гидростатическое давление? 8. Что доказывает уравнение Бернулли?

## § 27. Движение тел в жидкостях и газах

**Содержание:** значение изучения движения тел в жидкостях и газах; сила лобового сопротивления.

**Значение изучения движения тел в жидкостях и газах.** Изучение движения тел в жидкостях и газах связано с развитием авиации и с увеличением скорости движения морских судов. С этой целью рассмотрим силы, действующие на твердые тела, двигающиеся в жидкостях и газах.

На тело, движущееся в жидкости или газе, действуют две силы (равнодействующую этих сил обозначим  $\vec{R}$ ).

Первая сила ( $\vec{R}_x$ ) направлена в сторону, противоположную движению тела, она называется *лобовым сопротивлением*. Вторая сила ( $\vec{R}_y$ ), направленная перпендикулярно направлению движения тела, называется *подъемной силой* (рис. 36).

**Лобовое сопротивление.** Определяется при помощи выражения  $R_x = C_x \frac{\rho v^2}{2} S$ , где  $C_x$  — безразмерный коэффициент, зависит от формы тела и от положения тела относительно потока;  $\rho$  — плотность среды;  $v$  — скорость движения тела;  $S$  — наибольшее поперечное сечение тела.

**Подъемная сила** может быть определена формулой  $R_y = C_y \frac{\rho v^2}{2} S$ , где  $C_y$  — безразмерный коэффициент подъемной силы,  $\alpha$  — угол атаки потока. Его надо выбрать таким, чтобы лобовое сопротивление было маленьким, а подъемная сила — большой. Чем больше бу-

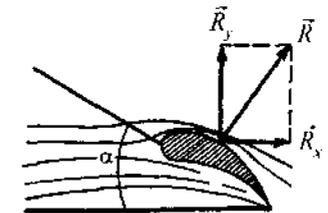


Рис. 36

дет коэффициент  $K = \frac{C_y}{C_x}$ , называемый качеством крыла, тем лучше выполняется это условие.



### Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается значение изучения движения тела в жидкостях и газах? 2. Начертите и покажите силы, действующие на тело, движущееся в жидкостях и газах? 3. Как относительно направления движения направлено лобовое сопротивление? 4. Чему равно лобовое сопротивление? 5. Как относительно направления движения направлена подъемная сила? 6. Чему равна подъемная сила? 7. В чем заключается значение угла атаки? 8. Чему равен коэффициент, показывающий качество крыла, и какое значение он имеет?



### Образцы решения задач

**Задача 1.** Высота столба воды в стакане 8 см. Какое давление на дно стакана оказывает вода? Если вместо воды будет ртуть?

**Дано:**

$$H = 0,08 \text{ м};$$

$$\rho_1 = 1000 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_2 = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3;$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2.$$

---


$$p_1 - ?, p_2 - ?$$

**Решение:** Гидростатическое давление, оказываемое водой на дно стакана, определяется выражением  $p_1 = \rho_1 gh$ . Для случая, когда имеется ртуть,  $p_2 = \rho_2 gh$ .

Подставим данные в выражения:

$$p_1 = 1000 \cdot 9,8 \cdot 0,08 \text{ Па} = 784 \text{ Па};$$

$$p_2 = 13,6 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,08 \text{ Па} = 10662,4 \text{ Па} = 10,66 \text{ кПа}.$$

Ответ:  $p_1 = 784 \text{ Па}; p_2 = 10,66 \text{ кПа}.$

**Задача 2.** По горизонтально расположенной трубе с переменным сечением течет вода. Если скорость воды в широкой части трубы равна 20 см/с, требуется найти скорость воды в узкой части трубы, диаметр которой в 1,5 раза меньше диаметра в широкой части.

**Дано:**

$$v_1 = 20 \text{ см/с} = 0,2 \text{ м/с};$$

$$\frac{d_1}{d_2} = 1,5.$$

---


$$v_2 = ?$$

**Решение:** Для воды в трубе напишем уравнение неразрывности  $v_1 S_1 = v_2 S_2$ . Отсюда найдем скорость потока в узкой части трубы:

$$v_2 = \frac{S_1}{S_2} v_1.$$

Если учесть, что поперечное сечение трубы определяется в

$$\text{виде } S_1 = \pi \left(\frac{d_1}{2}\right)^2, S_2 = \pi \left(\frac{d_2}{2}\right)^2, \text{ то}$$

$$v_2 = \frac{\pi \left(\frac{d_1}{2}\right)^2}{\pi \left(\frac{d_2}{2}\right)^2} v_1 = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \cdot v_1.$$

Используя данные, получим:

$$v_2 = (1,5)^2 \cdot 0,24 \text{ м/с} = 0,45 \text{ м/с}.$$

Ответ:  $v_2 = 0,45 \text{ м/с}.$



### Задачи для самостоятельного решения

1. Какое давление на дно сосуда оказывает слой керосина высотой 0,2 м? ( $p = 4 \text{ кПа}$ )

2. Водолаз в скафандре может опуститься на глубину 225 м. Хороший ныряльщик может нырнуть на глубину 20 м. Чему равно давление воды в море на этих глубинах? ( $p_1 = 2575 \text{ кПа}; p_2 = 206 \text{ кПа}$ )

3. Площадь куска льда — 8 м<sup>2</sup>, а высота — 25 см. Может ли лед полностью погрузиться в пресную воду, если на него встанет человек весом 600 Н? (не погрузится)

4. Скорость течения нефти в широкой части трубы 2 м/с. Найти скорость течения нефти в узкой части трубы, если разность статического давления в широкой и узкой частях трубы равны 6,65 кПа. ( $v_2 = 4,3 \text{ м/с}$ )

### Тестовые вопросы

1. В покоящихся жидкостях давление в любом месте во всех направлениях одинаковое и по всему объему покоящейся жидкости передается одинаково. Какой закон характеризует это явление?

- A. Архимеда.                      В. Паскаля.                      С. Бернулли.  
D. Торигелли.                      Е. Стокса.

2. От каких величин зависит выталкивающая сила в жидкостях?

- A. Плотности жидкости.                      В. Объема тела.  
C. Высоты столбца жидкости.                      D. Силы давления.  
E. Правильные ответы А и В.

3. Какая из приведенных формул выражает уравнение Бернулли?

A.  $S_1V_1 = S_2V_2 = \text{const}$       B.  $\frac{\rho \cdot v^2}{2} + \rho g \cdot h + p = \text{const.}$

C.  $\frac{\rho \cdot v^2}{2} + \rho g \cdot h + p = \text{const.}$       D.  $R_x = C_x \frac{\rho v^2}{2} S.$

E. Правильного ответа нет.

4. В воду опустили якорь весом 300 кПа. Какую силу надо потратить, чтобы поднять его?

A. 1645 Н.      B. 2316 Н.      C. 1845 Н.  
D. 1615 Н.      E. 2114 Н.

5. Какое давление возникает в результате движения жидкости?

- A. Динамическое.      B. Статическое.  
C. Гидростатическое.      D. Внешнее.  
E. Правильные ответы B и C.

### Основные выводы

**Давлением жидкости** называют физическую величину, определяемую силой, действующей со стороны жидкости на единицу площади нормально к ней:  $p = \frac{\Delta F}{\Delta S}$ . Единица давления в СИ —

$$1 \text{ Па} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

**Закон Паскаля:** в покоящихся жидкостях давление в любом месте во всех направлениях одинаковое и по всему объему покоящейся жидкости передается одинаково.

**Гидростатическое давление жидкости:**  $P = \rho gh$ .

**Сила Архимеда.** На тело, погруженное в жидкость, со стороны этой жидкости действует сила, направленная вверх и равная весу, вытесненной телом жидкости:  $F_A = \rho g V$ .

**Уравнение неразрывности:**  $S_1v_1 = S_2v_2 = \text{const}$ . Произведение скорости потока жидкости на поперечное сечение потока есть величина постоянная.

**Уравнение Бернулли:**  $\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const.}$



## ГЛАВА VII КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Колебания — это движение или процессы, которые повторяются через определенные интервалы времени. Примером этому могут быть качания маятника часов, вибрация струн музыкальных инструментов, биение сердца. Природа колебаний может быть разной. Например, качание маятника часов — это механическое колебание, изменение направления электрического тока — электрическое колебание. Однако, все колебательные процессы описываются одинаковыми характеристиками и одинаковыми уравнениями. Отсюда следует целесообразность единого подхода к изучению колебаний различной физической природы.

*Свободными колебаниями* называются колебания, возникающие за счет первоначально сообщенной энергии, переданной внешними силами, при последующем отсутствии внешних воздействий на колебательную систему.

Колебания, совершаемые телами под воздействием внешних сил, называют *вынужденными*.

Резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты вынужденных колебаний с частотой свободных колебаний называют *резонансом*.

Частота, при которой происходит резонанс, называется *резонансной частотой*.



### § 28. Гармонические колебания и их характеристики. Пружинный и математический маятники

**Содержание:** гармонические колебания; уравнение гармонического колебания; период и частота гармонического колебания; пружинный маятник, математический маятник.

**Гармонические колебания.** *Гармоническим колебанием* называют физическую величину, колебания которой изменяются со временем по закону косинуса (синуса).

Простейшим типом колебаний являются гармонические колебания. Их рассмотрение важно по двум причинам: во-первых, колебания, встречающиеся в природе и технике, часто имеют характер, близкий к гармоническому; во-вторых различные периодические процессы можно представить как наложение друг на друга гармонических колебаний.

**Уравнение гармонического колебания.** Гармоническое колебание величины  $S$  описывается следующей формулой:

$$S = A \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (28.1)$$

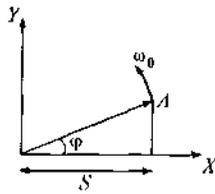


Рис. 37

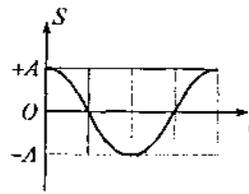


Рис. 38

где  $A$  — амплитуда колебания;  $\omega_0$  — циклическая частота;  $\varphi$  — начальная фаза колебания (рис. 37);  $(\omega_0 t + \varphi)$  — фаза колебания, характеризующаяся углом отклонения колеблющейся точки от положения равновесия. Так как косинус принимает значения от  $+1$  до  $-1$ , то и  $S$  тоже принимает значения от  $+A$  до  $-A$  (рис. 38).

Скорость колеблющейся точки

$$v = \frac{ds}{dt} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi), \quad (28.2)$$

ускорение

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (28.3)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}, \quad (28.4)$$

где  $T$  — период колебания.

$$\nu = \frac{1}{T}, \quad (28.5)$$

$\nu$  — частота колебания.

Сравнивая (28.4) и (28.5) получим

$$\omega_0 = 2\pi\nu. \quad (28.6)$$

Единица частоты в СИ — герц (Гц), названный в честь немецкого физика Г. Герца.

1 Гц — частота периодического процесса, при которой за 1 секунду совершается один цикл процесса:

$$[\nu] = \frac{1}{[T]} = \frac{1}{1\text{с}} = 1\text{с}^{-1} = 1\text{ Гц}.$$

Полная механическая энергия точки, совершающей гармоничное колебание, равна сумме кинетической и потенциальной энергий и остается постоянной:

$$E = E_k + E_p = \frac{m}{2} A^2 \omega_0^2. \quad (28.7)$$

Теперь познакомимся с некоторыми устройствами, совершающими гармоническое колебание. Самыми простыми из них являются пружинный и математический маятник.

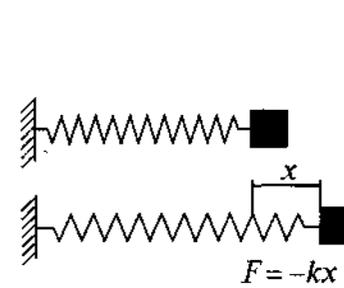


Рис. 39

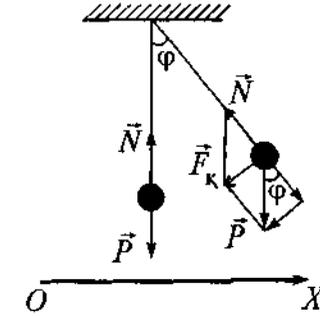


Рис. 40

**Пружинный маятник.** Пружинным маятником называют груз массой  $m$ , прикрепленный к абсолютно упругой пружине и совершающий гармонические колебания под действием упругой силы  $F = kx$  (рис. 39), где  $k$  — жесткость пружины,  $x$  — отклонение тела от положения равновесия.

Циклическая частота пружинного маятника

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (28.8)$$

Период колебания

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (28.9)$$

Потенциальная энергия пружинного маятника

$$E_p = \frac{kx^2}{2}. \quad (28.10)$$

**Математический маятник.** Математическим маятником называют материальную точку, подвешенную на нерастяжимой и невесомой нити и совершающую колебательное движение под действием силы тяжести (рис. 40).

Выведенный из положения равновесия на угол  $\varphi$  маятник приводится в движение под действием составляющей силы тяжести  $\vec{F}_T$ .

Циклическая частота математического маятника

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}, \quad (28.11)$$

период колебания

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (28.12)$$

## Потенциальная энергия математического маятника

$$E_n = \frac{mg}{l} \frac{x^2}{2}, \quad (28.13)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения;  $l$  — длина маятника;  $m$  — масса материальной точки.



### Вопросы для самопроверки

1. Какие процессы называют колебаниями? Приведите пять примеров, иллюстрирующих колебательное движение. 2. Какие колебания называют свободными колебаниями? 3. Какие колебания называют вынужденными колебаниями? 4. Что такое резонанс? 5. Какие колебания называются гармоническими колебаниями? 6. Приведите формулу гармонического колебания. 7. Приведите формулу периода гармонического колебания. 8. Приведите формулу частоты гармонического колебания. 9. Приведите формулу циклической частоты гармонического колебания. 10. Приведите формулу амплитуды гармонического колебания. 11. В чем выражается единица измерения частоты? 12. Какой маятник называют пружинным? 13. Как определяется частота, период и потенциальная энергия пружинного маятника? 14. Какой маятник называют математическим маятником? 15. Какая сила приводит в движение математический маятник? 16. Приведите формулы частоты колебания, периода и потенциальной энергии математического маятника. 17. Приведите формулу полной механической энергии точки, совершающей гармоническое колебание.



### Содержание: волны, характеристики волн, отражение и преломление волн

**Содержание:** волны; характеристики волн; плоские волны; принцип Гюйгенса; отражение и преломление волн.

**Волны.** Волновым процессом, или волной, называют процесс распространения колебания в среде. При распространении волн частицы среды не двигаются вместе с волной, а совершают колебания около положения равновесия. От частицы к частице передается только состояние колебательного движения и энергия волны. Поэтому свойство, присущее всем волнам, — это перенос энергии, а не перенос вещества.

Волны на поверхности воды — упругие волны и этим они отличаются от электромагнитных волн.

Упругими волнами называют механические возмущения, распространяющиеся в упругой, т. е. твердой, жидкой и газообразной среде. Упругие волны бывают поперечными и продольными.

В продольных волнах частицы среды колеблются вдоль направления распространения волны.

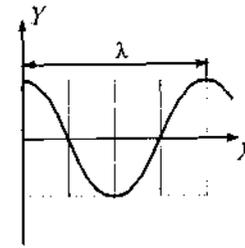


Рис. 41



Рис. 42

В поперечных волнах частицы среды колеблются в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. В жидкостях и газах возникают только продольные волны. В твердых телах могут возникать и продольные, и поперечные волны.

**Характеристики волн.** Расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе, называется длиной волны и обозначается буквой  $\lambda$  (рис. 41).

$$\lambda = vT, \quad (29.1)$$

где  $v$  — скорость распространения волны;  $T$  — период. Если учесть, что  $T = \frac{1}{\nu}$ , то

$$v = \lambda \cdot \nu, \quad (29.2)$$

где  $\nu$  — частота.

**Плоская волна.** При углубленном изучении процесса распространения волны выясняется, что колеблются не только частицы, вдоль оси  $X$ , но и совокупность частиц, расположенных в определенном объеме. Другими словами, волна, распространяясь от источника колебаний, охватывает все новые и новые области пространства. Геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени  $t$ , называют волновым фронтом. Геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе, называют волновой поверхностью.

Волновые поверхности представляют собой совокупность концентрических сфер. Волна, у которой поверхность состоит из сфер, называется плоской, или сферической волной. Линия, перпендикулярная к волновой поверхности, называется лучом. Волна распространяется по направлению луча.

**Принцип Гюйгенса.** Каждая точка среды, до которой дошло возмущение, сама становится источником вторичных волн. Поверхность, касательная ко всем вторичным волнам, представляет собой волновую поверхность в следующий момент времени (рис. 42). Принцип Гюгенса объясняет отражение волн.

**Принцип отражения волн.** Луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости. Угол отражения  $\gamma$  равен углу падения  $\alpha$  (рис. 43).

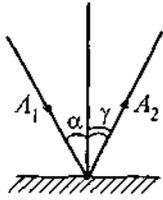


Рис. 43

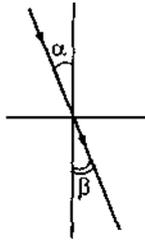


Рис. 44

**Преломление волны.** Изменение направления распространения волны на границе двух сред называется *преломлением волны* (рис. 44). Луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точку падения на границе двух сред, лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух сред.



**Вопросы для самопроверки**

1. Что называют волной? 2. Как движутся частицы среды при распространении волны? 3. Что переносится при распространении волны: вещество или энергия? 4. Виды воли. 5. Какие волны называют упругими волнами? 6. Какие волны называют продольными волнами? 7. А какие поперечными? 8. Какие волны возникают в жидкостях и газах? 9. Какие волны возникают в твердых телах? 10. Что называют длиной волны? 11. Какие отношения существуют между скоростью распространения волны, длиной волны и частотой? 12. Что называют фронтом волны? 13. Что называют поверхностью волны? 14. Какие волны называют плоскими? 15. В чем заключается принцип Гюйгенса? 16. В чем заключается принцип отражения волны? 17. В чем заключается принцип преломления волны?



**Содержание**

характеристики звуковых волн; скорость звука; интенсивность звука; громкость звука и другие характеристики; эффект Доплера для звуковых волн; ультразвук.

**Звуковые волны.** Когда волны достигают человеческого уха, они вынуждают колебаться перепонки уха и человек слышит звук. Звуковые (акустические) волны являются упругими. Частота звуковых волн лежит в пределах 16—20 000 Гц.

Волны с частотами  $\nu < 16$  и  $\nu > 20\ 000$  Гц не воспринимаются человеческим ухом. Волны с частотой  $\nu < 16$  Гц называются *инфразвуком*. Волны с частотой  $\nu > 20\ 000$  Гц называются *ультразвуком*. Кроме этого, мощность звука должна быть достаточной, чтобы вызвать звуковое восприятие органом слуха.

Звуковые волны как и все волны распространяются в среде и в пустоте не могут распространяться.

В газах и жидкостях звуковые волны могут быть только продольными, так как эти среды обладают упругостью лишь по

отношению к деформациям сжатия (растяжения). В твердых телах звуковые волны могут быть как продольными, так и поперечными, так как твердые тела обладают упругостью по отношению к деформациям сжатия (растяжения и сдвига).

**Скорость звука.** Почему сначала мы видим молнию, и лишь затем слышим раскаты грома? Это явление показывает, что скорость звука намного меньше скорости света.

Скорость звука в воздухе при  $T = 273$  К равна 331 м/с. Скорость распространения волн зависит от среды и температуры. Это свойство присуще и скорости распространения звука. Например, скорость распространения звука в воде

$$v_{\text{в}} = 1450 \text{ м/с, а в стали — } v_{\text{ст}} = 5000 \text{ м/с.}$$

**Интенсивность звука (сила звука).** *Интенсивностью звука* называют величину, определяемую количество энергии переносимой звуковой волной за 1 с сквозь единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны:

$$I = \frac{W}{St}. \quad (30.1)$$

Единица интенсивности звука в СИ — ватт на метр в квадрате ( $\text{Вт/м}^2$ ):

$$[I] = \frac{[W]}{[S][t]} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ м}^2 \cdot 1 \text{ с}} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (30.2)$$

Энергия волны прямо пропорциональна квадрату амплитуды и квадрату частоты волны. Поэтому говорят, что интенсивность звуковой волны прямо пропорциональна квадрату амплитуды и квадрату частоты волны.

Следует отметить, что чувствительность человеческого уха различна для разных частот. Для каждой частоты колебания существует определенная минимальная интенсивность звука, способная вызвать звуковое ощущение. Если интенсивность превышает определенный предел, то звук не слышен, и вызывает только болевое ощущение. Таким образом, для каждой частоты колебания существует наименьшая (порог слышимости) и наибольшая (порог болевого ощущения) интенсивность звука. На рисунке 45 представлена зависимость порогов слышимости и болевого ощущения от частоты звука. Между ними располагается область слышимости.

**Громкость звука и другие характеристики.** Громкость звука — эта величина, которая зависит от интенсивности звука. По закону Вебера-Фехнера с ростом интенсивности звука громкость возрастает по логарифмическому закону:

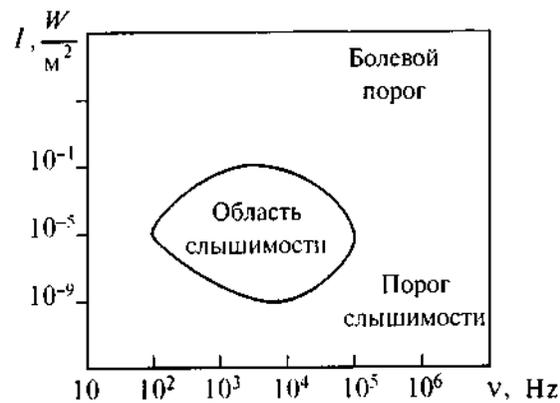


Рис. 45

$$\bar{L} = \lg \frac{I}{I_0},$$

где  $I_0$  — интенсивность звука на пороге слышимости, принимаемая для всех звуков равной  $10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>;  $L$  — величина, называемая уровнем интенсивности звука и измеряемая в белах (Б) или децибелах (дБ). Физиологическая характеристика звука — уровень громкости. Она измеряется в фонах. Если при частоте 1000 Гц уровень интенсивности будет 1 дБ, то громкость звука будет равна 1 фону.

Кроме громкости звука для его характеристики используется еще понятие высота и тембр звука. *Высота звука* зависит от частоты звука, качество же звука определяется человеком субъективно. С ростом частоты высота звука увеличивается.

*Тембр звука* — величина, характеризующая распределение энергии между определенными частотами. Например, различные певцы, берущие одну и ту же ноту, имеют различный акустический спектр, т. е. они имеют различный тембр.

**Эффект Доплера для звуковых волн.** Из опыта известно, что тон гудка поезда повышается по мере приближения и понижается при удалении. Другими словами, движение источника колебаний (источника сигнала) относительно приемника (уха) приводит к изменению частоты принимаемых колебаний. Это явление носит название *эффекта Доплера*. Таким образом, *эффектом Доплера называется изменение частоты колебаний, воспринимаемых приемником при движении источника этих колебаний и приемника относительно друг друга.*

**Применение ультразвуков.** Упругие волны с частотой, превышающей 20000 Гц, называют ультразвуком. Частота ультра-

звука высокая, а длина волны маленькая, поэтому можно получать остронаправленные пучки.

В технике ультразвук получают двумя методами: 1) при помощи механических воздушных и жидкостных свистков, сирен; 2) в результате превращения электромеханических колебаний в механические колебания.

Но область применения ультразвука очень большая. Если пропустить ультразвуковой сигнал через исследуемую деталь, то можно обнаружить в ней дефекты по характерному рассеянию пучка и по появлению ультразвуковой тени. Основываясь на этом принципе, была создана отрасль *ультразвуковая дефектоскопия*. Ультразвук также применяется для улучшения обмена веществ, при изменении физических свойств вещества, для механической обработки изделий, в медицине и в других областях.



### Вопросы для самопроверки

1. Какие волны называют звуковыми?
2. В каком диапазоне лежат звуковые частоты?
3. Как называют звуки с частотой меньше 16 Гц?
4. Как называют звуки с частотой выше 20000 Гц?
5. Какие звуковые волны распространяются в пустоте: продольные или поперечные?
6. Чему равна скорость звука?
7. Зависит ли скорость звука от температуры и от среды?
8. Что такое интенсивность звука и какова ее единица измерения?
9. Что такое порог слышимости? А болевой порог?
10. Как определяется громкость звука?
11. Как определяется степень интенсивности звука?
12. Как определяется степень громкости звука?
13. Как определяется высота звука?
14. Как определяется тембр звука?
15. В чем заключается эффект Доплера для звуковых волн?
16. Какие вы знаете методы получения ультразвуковых волн?
17. Какое свойство ультразвука дает возможность его широкого применения?
18. В каких областях применяется ультразвук?
19. Что такое ультразвуковая дефектоскопия?



### Образцы решения задач

**Задача 1.** Уравнение колебания имеет вид  $x = A \cos \omega(t + \tau)$ . Найти период  $T$ , частоту  $\nu$  и начальную фазу  $\varphi$ . Взять  $\omega = 2,5\pi$  с<sup>-1</sup>;  $\tau = 0,4$  с.

**Дано:**

$$x = A \cdot \cos \omega(t + \tau);$$

$$\omega = 2,5\pi \text{ с}^{-1};$$

$$\tau = 0,4 \text{ с.}$$

$$T = ?$$

$$\nu = ?$$

$$\varphi = ?$$

**Решение.** Данное уравнение колебания приведем к виду уравнения гармонического колебания:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi)$$

$x = A \cos(\omega t + \omega \tau)$  и, сравнив эти два уравнения, получим

$$\varphi = \omega \tau,$$

$$v = \frac{\omega}{2\pi},$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{\nu}.$$

Подставив данные в найденные выражения, получим  
 $\varphi = 0,25 \cdot \pi \cdot 0,4 \text{ рад} = \pi \text{ рад};$

$$\nu = \frac{2,5\pi}{2\pi} \text{ с}^{-1} = 1,25 \text{ с}^{-1} = 1,25 \text{ Гц}; \quad T = \frac{2\pi}{2,5\pi} \text{ с} = 0,8 \text{ с}.$$

Ответ:  $T = 0,8 \text{ с}; \nu = 1,25 \text{ Гц}; \varphi = \pi \text{ рад}.$

**Задача 2.** Когда на пружину подвесили груз массой  $m$ , она растянулась на 9 см и образовался пружинный маятник. Найти период колебания маятника.

**Дано:**

$$x = 9 \text{ см} = 9 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$T = ?$

**Решение:** Период пружинного маятника определяется следующей формулой:

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

где  $m$  — масса груза;  $k$  — жесткость пружины. Значение упругой силы, возникающей в растянутой пружине  $F = kx$ .

Условие равновесия при растяжении  $F = P = mg$ ,

$$kx = mg.$$

Отсюда

$$m = \frac{kx}{g}.$$

Используя это выражение для периода, получим

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{kx}{gk}} = 2\pi \sqrt{\frac{x}{g}}.$$

Используя данные, находим:

$$T = 2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{\frac{9 \cdot 10^{-2}}{9,8}} = 0,6 \text{ с}.$$

Ответ:  $T = 0,6 \text{ с}.$



#### Задачи для самостоятельного решения

1. Найти массу груза, который на пружинке с жесткостью 205 Н/м делает 20 колебаний за 16 с ( $m = 4 \text{ кг}$ ).

2. Как относятся длины математических маятников, если за одно и то же время один из них совершает 10, а второй 30 колебаний? (9:1)

3. Во сколько раз изменилась полная механическая энергия колеблющегося маятника при уменьшении его длины в 3 раза и увеличении амплитуды в 2 раза? (в 12 раз)

4. Какое значение получил для ускорения свободного падения учащийся при выполнении лабораторной работы, если маятник длиной 20 см за 1 минуту совершил 34 колебания? ( $g = 10,1 \text{ м/с}^2$ )

5. Длина звуковой волны в воздухе для самого низкого мужского голоса достигает 4,3 м, а для самого высокого женского голоса — 25 см. Найти частоту колебаний этих голосов. Скорость звука в воздухе 340 м/с. ( $\nu_{\text{м}} = 79 \text{ Гц}; \nu_{\text{ж}} = 1360 \text{ Гц}$ )

#### Тестовые вопросы

1. Движения, повторяющиеся через определенное время, называются...

- A. Волны.                      В. Колебания.  
 С. Резонатор.                Д. Свободные колебания.  
 Е. Вынужденные колебания.

2. Найдите уравнение гармонического колебания.

- A.  $S = A \cos(\omega_0 t + \varphi).$                       В.  $X = X_m \cos \omega t.$

- C.  $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}.$                       Д.  $E_p = \frac{mg}{l} \frac{x^2}{2}.$

Е. Правильные ответы А и В.

3. Закон колебания материальной точки задан в виде  $x = 0,03 \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) \text{ м}$ . Найдите модуль смещения точки в метрах по истечении времени  $t = \frac{3}{4} T$ .

- A. 0,05.                      В. 0,01.                      С. 0,04.                      Д. 0,02.                      Е. 0,03.

4. Среди приведенных уравнений найдите выражение для периода математического маятника.

- A.  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$                       В.  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$                       С.  $T = 2\pi \sqrt{LC}.$

- D.  $T = \frac{2\pi}{\omega}.$                       Е.  $T = \frac{1}{\nu}.$

5. Какие волны называются поперечными?  
 А. Волны на поверхности воды. В. Ультразвуковые волны.  
 С. Радиоволны. D. Световые волны.  
 Е. Звуковые волны в газах.
6. От чего зависит высота звуковых волн?  
 А. Амплитуды колебания.  
 В. Интенсивности волны.  
 С. Частоты звука.  
 D. Фазы колебания.  
 Е. Скорости распространения звука.
7. Найти массу груза, который на пружине с жесткостью 250 Н/м делает 20 колебаний за 16 с.  
 А. 4 кг. В. 6 кг. С. 6,5 кг.  
 D. 8 кг. Е. 5,5 кг.

#### Основные выводы

*Гармоническим колебанием* называют физическую величину какого-либо тела, колебания которого изменяются со временем по закону косинуса (синуса).

Уравнение гармонического колебания:  $S = A \cdot \cos(\omega_0 t + \alpha)$ ;

периода  $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$ ; частоты:  $\nu = \frac{1}{T}$ . Единица частоты в СИ — Гц.

*Пружинным маятником* называют груз массой  $m$ , прикрепленный к абсолютно упругой пружине и совершающий гармоническое колебание под действием упругой силы  $F = -kx$ .

Его циклическая частота  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ , период  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ ; потенциальная энергия  $E_p = \frac{kx^2}{2}$ .

*Математическим маятником* называют материальную точку, подвешенную на нерастяжимой и невесомой нити и совершающую колебательное движение под действием силы тяжести.

Циклическая частота математического маятника  $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$ ;  
 период  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$  и потенциальная энергия  $E_p = \frac{mg}{l} \frac{x^2}{2}$ .

*Волновым процессом*, или волной, называют процесс распространения колебания в среде. Упругие волны, вызывающие восприятие звука человеком, называются звуковыми. Частота звуковой волны лежит в пределах 16—20000 Гц.



## ГЛАВА VIII. ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Изучение физики мы начали с классической механики. Было отмечено, что классическая механика изучает законы движения макротел, скорости движения которых во много раз меньше скорости света в воздухе. Тогда какими будут законы движения тел, скорости которых будут близки к скорости света в вакууме? Будут ли они отличаться от законов классической физики или нет? Чтобы ответить на эти и другие возникающие вопросы, приступим к изучению одного из самых интересных разделов физики, совершивших коренной переворот во взгляде на представления о пространстве, времени, материи и движении, созданного в 1905 г. А. Эйнштейном «Основы специальной теории относительности».



### § 31. Принцип относительности в механике. Преобразования Галилея

**С о д е р ж а н и е:** принцип относительности Галилея; преобразования Галилея для координат; преобразования скорости и ускорения; инвариантные величины в классической механике.

**Принцип относительности Галилея.** Движение материальной точки изучается в пространстве и времени. Было отмечено, что эту задачу выполняет декартова система координат с прикрепленной к ней часами. Если системы отсчета находятся в состоянии покоя или совершают равномерное прямолинейное движение относительно друг друга, и в одной из них справедливы законы динамики Ньютона, то эти системы будут *инерциальными* системами отсчета.

Во всех инерциальных системах отсчета законы классической механики имеют один и тот же вид. Этот принцип в механике называется принципом относительности, или принцип относительности Галилея.

**Преобразования координат Галилея.** Чтобы понять идею этого принципа, рассмотрим две координатные системы  $K$  (оси  $x, y, z$ ) и  $K'$  (оси  $x', y', z'$ ), движущиеся относительно друг друга равномерно и прямолинейно со скоростью  $\vec{u}$  ( $\vec{u} = \text{const}$ ). Для простоты рассмотрим случай, когда система  $K'$  движется относительно  $K$  вдоль оси  $X$  (рис. 46). (В этом нет ничего трудного, потому что выбор координатных систем для удобства решения задачи зависит от нас). Отсчет времени начнем с момента, когда начала координат обеих систем совпадают. Пусть в произ-

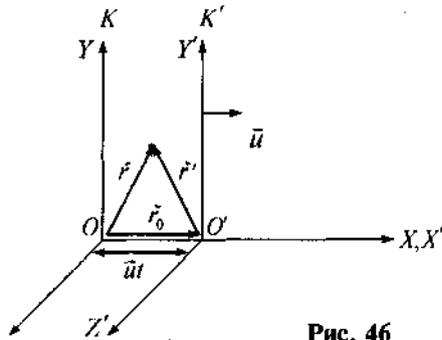


Рис. 46

вольный момент времени  $t$  расположение этих систем относительно друг друга имеет вид, изображенный на рисунке 46. В течение этого времени система  $K'$  переместится относительно системы  $K$  вдоль оси  $x$  на вектор  $\vec{r}_0 = \vec{u}t$ . Теперь найдем связь между координатами точки  $A$  в обеих системах. Из рисунка 46 видно, что

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{r}_0 = \vec{r}' + \vec{u}t. \quad (31.1)$$

Уравнение (31.1) запишем в проекциях на оси координат:

$$\begin{aligned} x &= x' + ut, \\ y &= y', \\ z &= z'. \end{aligned} \quad (31.2)$$

Здесь из-за того, что движение происходит вдоль оси  $x$ , приняли во внимание  $u_x = u$ ,  $u_y = 0$ ,  $u_z = 0$ . Уравнения (31.1) и (31.2) носят название преобразования координат Галилея. Если принять во внимание, что в классической механике ход времени не зависит от относительного движения систем отсчета, тогда к преобразованиям (31.2) можно добавить еще одно уравнение:  $t = t'$ . Таким образом, для  $K' \rightarrow K$

$$\begin{aligned} x &= x' + ut, \\ y &= y', \\ z &= z', \\ t &= t'. \end{aligned} \quad (31.3)$$

**Преобразование скорости и ускорения.** Зная скорость  $\vec{v}'$  материальной точки в одной системе отсчета, можно определить ее скорость  $\vec{v}$  в другой системе отсчета. Например, по вагону поезда, движущегося со скоростью  $\vec{u}$ , идет человек со скоростью  $\vec{v}'$  относительно поезда. Его скорость  $\vec{v}$  относительно наблюдателя на вокзале определяется следующим образом:

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{u}. \quad (31.4)$$

Это выражение в классической механике выражает правило сложения скоростей.

Также ускорение точки  $A$  в обеих системах отсчета  $K$  и  $K'$  одинаково:

$$\vec{a} = \vec{a}'. \quad (31.5)$$

Таким образом, если в системе отсчета  $K$  на точку  $A$  не действует никакая сила ( $\vec{a} = 0$ ), то и в системе отсчета  $K'$  на нее не будет действовать никакая сила ( $\vec{a} = \vec{a}' = 0$ ).

**Инвариантные величины в классической механике.** Слово *инвариант* (invariantis) с латинского переводится как *постоянный*. Какие величины в классической механике остаются постоянными при переходе из одной системы отсчета в другую? Как показывает соотношение (31.5), при переходе от одной системы отсчета к другой уравнения классической механики не изменяются, т. е. они инварианты по отношению к преобразованиям координат. Значит, выражение (31.5) является доказательством принципа относительности в механике и показывает, что все механические процессы протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета. То есть с помощью любых опытов, проведенных в инерциальной системе отсчета, нельзя обнаружить, покоится эта система или движется равномерно и прямолинейно. Например, сидя в купе равномерно и прямолинейно движущегося поезда, нельзя определить, движется поезд или нет, не выглянув из окна купе.

Также в классической механике время  $t = t'$  и длина отрезка  $l = x_2 - x_1 = (x'_2 + ut) - (x'_1 + ut) = (x'_2 - x'_1) = l'$  — инвариантные величины.



#### Вопросы для самопроверки

1. Какое движение изучается в специальной теории относительности?
2. Какие системы называют инерциальными системами отсчета?
3. Что называют принципом относительности Галилея?
4. Что значит преобразование координат Галилея?
5. Почему считается, что движение происходит вдоль оси  $x$ ?
6. Приведите правило сложения скоростей в классической механике.
7. Приведите правило преобразования ускорения в классической механике.
8. Если в системе  $K$  на тело не действует сила, может ли она действовать в системе  $K'$ ?
9. Какие величины называют инвариантами?
10. Какие величины будут инвариантами в классической механике?
11. Позволяют ли опыты, проведенные в инерциальной системе отсчета, обнаружить, покоится эта система или движется равномерно и прямолинейно?
12. Какие еще инвариантные величины существуют в классической механике?

## § 32. Постулаты специальной теории относительности



А. Эйнштейн  
(1879 — 1955)

**С о д е р ж а н и е:** сложение скоростей; выводы А. Эйнштейна; постулаты специальной теории относительности.

**Сложение скоростей.** Ньютоновская механика, прекрасно объясняющая движение макротел, движущихся со скоростями, намного меньшими скорости света в вакууме ( $v \ll c$ ), с конца XIX века начала сталкиваться с некоторыми трудностями. Первые из них проявились в формуле сложения скоростей (31.4). Если источник света и приемник движутся равномерно и прямолинейно относительно друг друга, то измеряемая скорость

должна зависеть от их движения относительно друг друга. Например, если паровоз движется в нашу сторону со скоростью, равной скорости света ( $u = c$ ), то чему будет равна относительно нас скорость света ( $v' = c$ ) испускаемого осветителем паровоза? Согласно выражению (31.4)

$$v = v' + u = c + c = 2c, \quad (32.1)$$

т. е. скорость света относительно нас должна быть в два раза больше скорости света. Опыты показывают, что эти результаты абсолютно неверные.

**Выводы А. Эйнштейна.** А. Эйнштейн, глубоко задумавшись над решением возникшей проблемы, пришел к выводу, что нужно создать такую теорию, чтобы ее законы были граничными, т. е. законы для маленьких скоростей ( $v \ll c$ ) должны совпадать с законами классической механики. А. Эйнштейн, понявший необходимость нового мировоззрения на гармоничность пространства и времени, в 1905 году опубликовал свою работу «Электродинамика движущейся среды». В работе были изложены основы специальной теории относительности. Слово *специальная* утверждает, что в теории рассматриваются процессы, происходящие только в инерциальных системах отсчета. Вместе с этим, в специальной теории относительности за основу были взяты однородность и изотропность пространства, однородность времени. Специальную теорию относительности часто называют *релятивистской теорией*, а ее эффекты — *релятивистскими эффектами*.

**Постулаты специальной теории относительности.** Основу специальной теории относительности составляют следующие два

постулата (констатирование, принимаемое без доказательств), сформулированные А. Эйнштейном в 1905 году.

**I. Принцип относительности.** Никакие опыты (механические, электрические, оптические), проведенные внутри данной инерциальной системы отсчета, не дают возможности обнаружить, покоится ли эта система или движется равномерно и прямолинейно: все законы природы инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчета к другой.

**II. Принцип инвариантности скорости света.** Скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета.



### Вопросы для самопроверки

1. Уместна ли формула сложения скоростей классической механики для скоростей, близких к скорости света? 2. Каковы выводы А. Эйнштейна? 3. Что означает слово «специальная»? 4. Какая теория называется релятивистской? 5. Что называют релятивистским эффектом? 6. Сформулируйте постулаты Эйнштейна.

## § 33. Преобразования Лоренца и их результаты

**С о д е р ж а н и е:** преобразование координат Лоренца; выводы преобразования координат Лоренца; относительность непрерывности; относительность интервала времени; результаты относительности интервала времени.

**Преобразование координат Лоренца.** Пусть в некоторой инерциальной системе отсчета  $K'$  произошло событие и требуется через координаты  $(x', y', z', t')$  найти координаты этого события  $(x, y, z, t)$  в системе отсчета  $K$ . Система  $K'$  движется относительно системы  $K$  вдоль оси  $x$  со скоростью  $\vec{u} = \text{const}$ . Эта задача в классической физике решается с помощью *преобразования Галилея* (31.3).

Но выражение (31.3) получено исходя из рассуждения, что световой сигнал распространяется с бесконечно большой скоростью. Но после утверждения в специальной теории относительности о конечности скорости света пришлось написать новые формулы для преобразования координат. Эти формулы называются преобразованиями Лоренца для координат. Преобразования названы так в честь написавшего их нидерландского физика Х. Лоренца (1853—1928) и имеют следующий вид:

$$\begin{cases} x = \frac{x' + ut'}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \\ y = y'; \\ z = z'; \\ t = \frac{t' + \left(\frac{u}{c^2}\right) \cdot x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \end{cases} \quad (33.1)$$

Здесь введено обозначение  $\beta = \frac{u}{c}$ . Для сравнения формул преобразования в классической и релятивистской механике предлагается таблица 3.

Таблица 3

Чтобы перейти из $K' \rightarrow K$	
Преобразования Галилея	Преобразования Лоренца
$x = x' + ut'$	$x = \frac{x' + ut'}{\sqrt{1 - \beta^2}}$
$y = y'$	$y = y'$
$z = z'$	$z = z'$
$t = t'$	$t = \frac{t' + \left(\frac{u}{c^2}\right) x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}$

**Выводы, вытекающие из преобразования координат Лоренца.** Сравнивая приведенные в таблице преобразования Галилея и Лоренца, можно сделать следующие выводы:

1. При  $u \ll c$  ( $\beta = 0$ ) преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея, т. е. специальная теория относительности не отрицает классическую механику, но при малых скоростях  $u \ll c$  признает его как частный случай;

2. Как показывают преобразования Лоренца,  $u$  не может быть равно скорости света  $c$  и не может быть больше нее. В противном случае выражение под корнем станет равным нулю. При  $u > c$  выражение (33.1) становится отрицательным и преобразования Лоренца теряют свой смысл. Поэтому признают, что скорость света — это самая большая скорость, которую нельзя достичь.

3. Считавшиеся в преобразованиях Галилея абсолютными интервал времени и расстояние в релятивистской механике теряют

такое свойство. Другими словами, если в классической механике расстояние между двумя событиями и время между этими событиями при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую остаются неизменными, в релятивистской механике это правило нарушается. Причина для такого вывода в том, что в формуле для нахождения координаты присутствует время, а в формуле для нахождения времени присутствует координата. В формуле для нахождения  $x$  присутствует  $t'$ , а в формуле для нахождения  $t$  —  $x'$ . Таким образом, теория Эйнштейна имеет место не в трехмерном пространстве, к которому присоединяется понятие времени, а в четырехмерном пространстве, т. е. пространство + время.

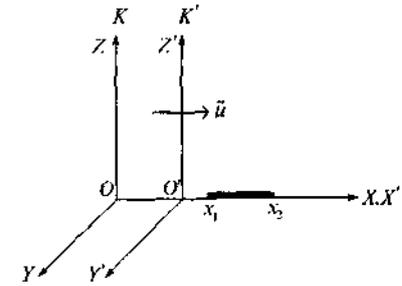


Рис. 47

**Относительность расстояний.** Рассмотрим стержень, покоящийся относительно системы  $K'$  и расположенный вдоль оси  $x'$ . В системе  $K'$  длина стержня будет  $l_0 = x'_2 - x'_1$ , здесь  $x'_1$  и  $x'_2$  — координаты стержня в системе  $K'$  в момент времени  $t'_0$ , индекс 0 показывает, что в системе отсчета  $K'$  стержень покоится (рис. 47). Стержень и система  $K'$  движутся относительно системы  $K$  со скоростью  $u$ . Определим длину стержня в системе  $K$ . Для этого надо в момент времени  $t$  измерить координаты концов стержня  $x_1$  и  $x_2$  в системе  $K$ . Их разность  $l = x_2 - x_1$  даст длину стержня в системе  $K$ . Из преобразования Лоренца находим

$$l_0 = x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - ut}{\sqrt{1 - \beta^2}} - \frac{x_1 - ut}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{l}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

или

$$l_0 = \frac{l}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (33.2)$$

Чтобы обсудить найденное выражение, оценим величину, стоящую в знаменателе: т. к.  $v < c$ , то  $\frac{v}{c} < 1$ . Квадрат числа меньше единицы также будет меньше единицы  $\left(\frac{v}{c}\right)^2 = \frac{v^2}{c^2} < 1$ . Если из единицы вычесть меньшее число, то результат тоже будет меньше единицы:  $1 - \frac{v^2}{c^2} < 1$ . (Известно, что это выражение не может быть равно нулю или меньше нуля). Если из этого числа взять квадратный корень, то результат тоже будет меньше единицы:

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \sqrt{1 - \beta^2} < 1. \quad (33.3)$$

Если  $l$  поделить на число, меньше единицы (конечно, меньше единицы, но больше нуля), результат будет больше делимого. Значит, выражение  $\frac{l}{\sqrt{1 - \beta^2}}$  должно быть больше  $l$ . Отсюда будет

$$l_0 > l. \quad (33.4)$$

Таким образом, длина стержня  $l_0$  в покоящейся системе  $K'$  получилась больше, чем длина  $l$  в системе  $K$ , относительно которой стержень движется. Длина стержня, который движется относительно инерциальной системы отсчета, уменьшается в направлении движения в  $\sqrt{1 - \beta^2}$  раз. Это сокращение длины называется *Лоренцовым сокращением*. Чем больше будет скорость движения  $u$ , тем больше будет и уменьшение.

Значит, длина стержня, являющаяся абсолютной в классической физике, т. е. во всех инерциальных системах отсчета являющаяся одинаковой, в специальной теории относительности она относительна, т. е. в различных инерциальных системах отсчета она получилась разной.

**Относительность промежутков времени.** Пусть в системе  $K$  в некоторой покоящейся точке (координата  $x$ ) произошло некоторое событие. Событие началось в момент времени  $t_1$  и закончилось в момент времени  $t_2$  (показания часов в моменты начала и конца события). Продолжительность интервала события равна  $t = t_2 - t_1$ . Это событие длится в системе  $K'$ :

$$t' = t_2' - t_1', \quad (33.5)$$

$t$  и  $t'$  связаны друг с другом следующим образом:

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (33.6)$$

Согласно рассуждениям, проведенным в предыдущем параграфе, и приняв во внимание (33.3), увидим, что  $t > t'$ . Значит, интервал времени  $t$ , отсчитанный по часам в системе  $K$ , с точки зрения наблюдателя, ведущего отсчет по часам в системе  $K'$ , длится дольше относительно  $t$ . Другими словами, часы, движущиеся относительно инерциальной системы отсчета, ходят медленнее, т. е. ход часов замедляется.

**Результаты относительности временного интервала.** После того как стал известен релятивистский эффект замедления хода часов, возникла проблема «парадокса близнецов». Пусть организовывается межзвездный полет на звезду, находящуюся

от Земли на расстоянии 500 световых лет (свет от звезды до Земли дойдет за 500 лет) со скоростью, близкой к скорости света  $\sqrt{1 - \beta^2} = 0,001$ . Если измерять время по земным часам, этот полет будет длиться  $t' = 1000$  лет. Для космонавта же это время длится  $t = \sqrt{1 - \beta^2} \cdot t' = 0,001 \cdot 1000 = 1$  год.

Если в полет отправить одного из родившихся близнецов, то он вырастет только на 1 год, когда второй близнец достигнет возраста 1000 лет. Так ли это на самом деле? Это вы можете узнать при глубоком изучении физики.



### Вопросы для самопроверки

1. Преобразование координат Галилея. 2. Преобразование координат Лоренца. 3. При каких условиях преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея? 4. Можно ли достичь скорости света в вакууме? 5. Могут ли инвариантные величины в классической механике *длина* и *интервал времени* быть инвариантными в релятивистской механике? 6. На каком основании можно сказать, что они не инвариантны? 7. В каком пространстве справедлива теория Эйнштейна? 8. В какой системе отсчета стержень достигнет своей наибольшей длины? 9. Что называют Лоренцовым сокращением длины? 10. Зависит ли длина стержня от скорости движения системы? 12. В какой системе интервал времени будет наименьшим? 13. Когда замедляется ход часов? 14. Что вы знаете о «парадоксе близнецов»?



### § 34. Релятивистская формула сложения скоростей

Содержание: формулы сложения скоростей; результаты формул сложения скоростей.

**Формулы сложения скоростей.** В § 32 было написано, что формула сложения скоростей

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{u} \quad (34.1)$$

при скоростях, близких к скоростям света, не согласуется с результатами опытов. Здесь  $\vec{v}$  и  $\vec{v}'$  — скорости тела в инерциальных системах отсчета  $K$  и  $K'$ ,  $\vec{u}$  — скорость систем относительно друг друга.

Формула сложения скоростей, найденная с помощью преобразования Лоренца, имеет следующий вид:

$$v = \frac{v' + u}{1 + \frac{u \cdot v'}{c^2}}. \quad (34.2)$$

Это выражение носит название *релятивистское сложение скоростей*.

Из формулы (34.2) видно, что если скорости  $v, v'$  и  $u$  будут намного меньше скорости света

$$\frac{u \cdot v'}{c^2} \ll 1,$$

то знаменатель выражения будет равен единице, и выражение (34.2) переходит в формулу сложения скоростей в классической механике (34.1)

**Результат формулы сложения скоростей.** Сможет ли формула, найденная для сложения скоростей (34.2), ликвидировать недостатки формулы сложения скоростей классической физики? Для проверки этого вернемся к примеру, который рассматривали в § 32.

Согласно этому примеру  $v' = u = c$  и находим  $v$  из (34.2):

$$v = \frac{c + c}{1 + \frac{c \cdot c}{c^2}} = \frac{2c}{1 + 1} = c,$$

т. е. скорость света от осветителя поезда остается равным  $c$ . Значит, скорость света в вакууме  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с остается граничной и нельзя достичь скорости большей, чем она.



#### Вопросы для самопроверки

1. Какова релятивистская формула сложения скоростей? 2. Переходит ли при маленьких скоростях релятивистская формула сложения скоростей в формулу сложения скоростей классической механики? 3. Сможет ли релятивистская формула сложения скоростей решить проблемы формулы сложения скоростей классической механики? 4. Можно ли достичь скорости выше скорости света в вакууме?



**Содержание:** релятивистская масса; релятивистский импульс; связь между массой и энергией.

**Релятивистская масса.** На основании представлений классической механики масса — неизменная величина. Но опыты, проведенные в 1901 году, показали, что с ростом скорости электрона растет и его масса.

Связь между массой движущегося тела и его скоростью движения выражается следующей формулой:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (35.1)$$

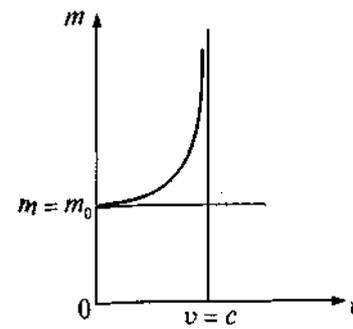


Рис. 48

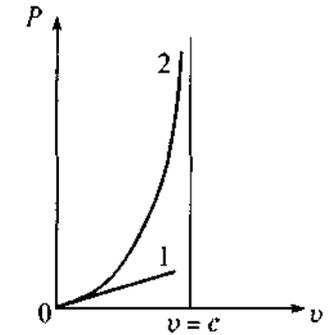


Рис. 49

где  $m$  — масса движущегося тела,  $\beta = \frac{v}{c}$ ;  $v$  — скорость движения,  $m_0$  — масса покоя, т. е. масса тела относительно покоящейся системы отсчета. Из (35.1) видно, если  $v \ll c$ , то  $\beta \ll 1$  и  $m = m_0$ . Значит, зависимость массы тела от скорости проявляется при скоростях, близких к скорости света. Зависимость массы от скорости приведена на рисунке 48.

Как в классической механике, так и в релятивистской, масса является мерой инертности. В релятивистской динамике с возрастанием скорости возрастает и инертность, т. е. чем больше будет скорость, тем труднее будет ее повышать. При  $v = c$  масса стремится к бесконечности. Поэтому ни одно тело, у которого масса покоя не равна нулю ( $m_0 \neq 0$ ), не может двигаться со скоростью, равной скорости света в вакууме. Существует только одна частица, которая движется с этой скоростью. Эта частица — фотон, у которой масса покоя равна нулю. В вакууме фотоны постоянно движутся со скоростью, равной скорости света.

**Релятивистский импульс.** Релятивистский импульс определяется следующим выражением:

$$\vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \vec{v}. \quad (35.2)$$

В классической механике импульс определялся выражением

$$\vec{p} = m_0\vec{v}. \quad (35.3)$$

Чтобы увидеть их разницу, начертим график зависимости импульса от скорости. На рисунке 49 линия 2 в соответствии с выражением (35.2) показывает зависимость релятивистского импульса от скорости, а линия 1 в соответствии с выражением (35.3) показывает зависимость импульса классической механики от скорости. Отсюда видно, что при маленьких скоростях  $v \ll c$  значения импульсов совпадают.

Из-за однородности пространства в релятивистской механике также выполняется закон сохранения релятивистского импульса: релятивистский импульс замкнутой системы сохраняется, т.е. не меняется со временем.

**Связь между массой и энергией.** В релятивистской механике изменение скорости приводит к изменению массы, а это в свою очередь приводит к изменению полной энергии. Значит, между полной энергией  $E$  и массой  $m$  существует взаимосвязь. Эта связь является фундаментальным законом природы, сформулированным Эйнштейном, и имеет следующий вид:

$$E = mc^2, \quad (35.4)$$

**Полная энергия системы равна произведению ее массы на квадрат скорости света в вакууме, или**

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}. \quad (35.5)$$

Любому телу, находится ли оно в движении (масса  $m$ ) или в состоянии покоя (масса  $m_0$ ), присуща определенная энергия. Если тело находится в покое, то его энергия определяется как

$$E_0 = m_0 c^2. \quad (35.6)$$

Энергия тела в покое — это его собственная энергия. В классической механике энергия покоя  $E_0$  не учитывается, считая, что при  $v = 0$  энергия покоя тела равна нулю.

**Кинетическая энергия.** В релятивистской механике полная энергия тела определяется следующим образом:

$$E = E_k + E_0. \quad (35.7)$$

Кинетическая энергия  $E_k$  тела определяется как разность его энергии в движении и энергии в покое:

$$E_k = E - E_0 = mc^2 - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right). \quad (35.8)$$

При  $v \ll c$  формула (35.8) переходит в выражение кинетической энергии в классической механике.

В результате однородности времени как в классической так и в релятивистской механике выполняется закон сохранения энергии: полная энергия замкнутой системы сохраняется, т.е. со временем она не изменяется.



### Вопросы для самопроверки

1. Изменяется ли масса в классической механике? 2. Изменяется ли масса в релятивистской механике? 3. Как изменяется масса движущегося тела? 4. Когда проявляется зависимость массы тела от скорости? 5. Как можно объяснить увеличение массы? 6. Почему тело с массой покоя, отличной от нуля, не может двигаться со скоростью света в вакууме? 7. Какими частицами являются фотоны? 8. Как определяется релятивистский импульс? 9. Выполняется ли закон сохранения релятивистского импульса? 10. Когда совпадают релятивистский и классический импульсы? 11. Приводит ли изменение скорости к изменению энергии? 12. Какая связь существует между энергией и массой? 13. Чему равна энергия тела в покое? 14. Чему равна полная энергия тела в релятивистской механике? 15. Чему равна кинетическая энергия тела в релятивистской механике?



### Образцы решения задач

**Задача 1.** Электрон и протон движутся друг против друга: скорость электрона равна  $0,97c$ , а скорость протона  $0,5c$ . Определите относительную скорость их движения.

**Дано:**

$$u_e = 0,97c;$$

$$u_p = 0,5c.$$

$$v = ?$$

**Решение:** Формула релятивистского сложения скоростей имеет следующий вид:

$$v = \frac{v' + u}{1 + \frac{u \cdot v'}{c^2}}.$$

В данной задаче систему отсчета  $K$  прикрепим к электрону. Тогда скорость системы отсчета  $K'$  относительно  $K$  будет равна  $u = u_e$ .

Скорость протона относительно системы  $K'$  будет равна  $v' = u_p$ . От нас требуется найти скорость протона  $v$  относительно системы  $K$ . Таким образом, используя данные  $u$ , скорость света в вакууме  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с:

$$v = \frac{0,5c + 0,97c}{1 + \frac{0,5c + 0,97c}{c^2}} = 0,99c = 2,97108c.$$

Ответ:  $v = 2,97 \cdot 10^8$  м/с.

**Задача 2.** С какой скоростью  $v$  двигалась частица, если релятивистская масса частицы больше ее массы покоя в 3 раза?

Дано:

$$\frac{m}{m_0} = 3.$$

$v = ?$

Решение. Релятивистская масса определяется следующим образом:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Из этого выражения находим  $v$ :

$$v = c \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\left(\frac{m}{m_0}\right)^2}}.$$

Учитывая данные и скорость света в вакууме  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с, находим

$$v = 3 \cdot 10^8 \sqrt{1 - \frac{1}{3^2}} \frac{\text{м}}{\text{с}} = 2,83 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Ответ:  $v = 2,83 \cdot 10^8$  м/с.



### Задачи для самостоятельного решения

1. Стержень движется относительно инерциальной системы отсчета вдоль длины с постоянной скоростью. При каком значении скорости длина стержня в этой системе будет на 1% меньше длины покоящегося стержня? ( $v = 423000$  м/с)

2. В межзвездном корабле имеются часы, сверенные с часами на Земле. На сколько отстанут часы на корабле при скорости корабля 7,9 км/с, если наблюдатель на Земле по своим часам отмерил 0,5 года? ( $\tau = 5,7 \cdot 10^{-3}$  с)

3. Найти релятивистский импульс электрона, движущегося со скоростью 0,8 с. ( $p = 2,05 \cdot 10^{-22}$  кг · м/с)

4. Найти кинетическую энергию электрона, движущегося со скоростью 0,6 с. ( $T = 0,34$  МэВ)

### Тестовые вопросы

1. При переходе из одной системы отсчета в другую уравнения классической механики не изменяются, т.е. они инвариантны относительно перестановок координаты. Какой это принцип?

- А. Независимость действия сил.
- В. Принцип относительности Галилея.
- С. Относительность перестановок Лоренца.

- Д. Относительность Эйнштейна.
- Е. Правильные ответы В и Д.

2. Укажите инвариантные величины в классической механике.

- А. Масса, ускорение, сила, время.
- В. Скорость, траектория, масса.
- С. Ускорение, сила, масса, перемещение.
- Д. Скорость, ускорение, масса, сила.
- Е. Правильного ответа нет.

3. Из приведенных ниже выражений укажите выражение для относительности длины.

А.  $l_0 = \frac{l}{\sqrt{1-\beta^2}}$ .      В.  $l = l_0 \sqrt{1-\beta^2}$ .      С.  $l = \frac{l_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$

Д.  $l_0 = l \cdot \sqrt{1-\beta^2}$ .      Е. Правильные ответы А и В.

4. Покажите величины, инвариантные в релятивистской механике.

- А. Масса, время, длина.
- В. Масса, время, скорость.
- С. Время, длина, объем, площадь.
- Д. Длина, время, давление, сила.
- Е. Правильные ответы А и В.

### Основные выводы

**Принцип относительности Галилея:** во всех инерциальных системах отсчета законы классической механики имеют один и тот же вид.

**Преобразования Галилея:**  $x = x + ut$ ;  $y = y$ ;  $z = z$ ;  $t = t$ ;  $v = v + u$ .

**Постулаты Эйнштейна:**

1. Никакие опыты, проведенные внутри данной инерциальной системы отсчета, не дают возможности обнаружить, покоится ли эта система или движется равномерно и прямолинейно.
2. Скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета.

Преобразования координат Лоренца:

$$x = \frac{x' + ut'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' + \left(\frac{u}{c^2}\right)x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Преобразование скоростей Лоренца:

$$v = \frac{v' + u}{1 + \frac{u \cdot v'}{c^2}}$$

Релятивистская масса:  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ .

Релятивистский импульс:  $\vec{P} = m\vec{v} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \vec{v}$ .

**Связь между массой и энергией.** Полная энергия системы равна произведению ее массы на квадрат скорости света в вакууме

$$E = mc^2 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} c^2$$

Энергия тела в покое

$$E_0 = m_0 c^2$$



## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Молекулярная физика и термодинамика — это разделы физики, в которых изучаются макроскопические процессы в телах, состоящих из огромного числа атомов и молекул, их хаотического движения и взаимодействия. Для исследования этих процессов применяются два метода: первый — молекулярно-кинетический метод, в его основе лежит молекулярная физика; а второй термодинамический метод, в его основе лежит термодинамика.

*Молекулярная физика* — раздел физики, изучающий строение и свойства вещества исходя из молекулярно-кинетических представлений, основывающихся на том, что все тела состоят из молекул, находящихся в непрерывном движении.

Процессы, изучаемые в молекулярной физике, являются результатом действия огромного числа молекул. Поэтому свойства макроскопической системы определяются усредненными значениями динамических характеристик этих частиц (скорость, энергия и т. д.). Например, температура тела определяется скоростью беспорядочного движения молекул, составляющих тело. Если в любой момент можно говорить о средней скорости молекул, то говорить о температуре одной молекулы не имеет смысла.

*Термодинамика* — раздел физики, изучающий общие свойства макроскопических систем, находящихся в термодинамическом равновесии и процессы перехода между этими состояниями. Она работает опираясь на термодинамические законы; эти фундаментальные законы установлены в результате обобщения опытных данных.



## ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Большое число проведенных опытов и теоретических изысканий привели к созданию следующих трех положений, лежащих в основе молекулярно-кинетической теории:

1. Все вещества состоят из мельчайших частиц — атомов и молекул. В свою очередь они сами состоят из еще более мелких частиц (электронов, протонов, нейтронов).
2. Атомы и молекулы вещества находятся в непрерывном хаотическом движении.
3. Между частицами любого вещества существуют силы взаимодействия — притяжения и отталкивания. Эти силы имеют электромагнитную природу.



**Содержание:** размеры и масса молекул; количество вещества; число Авогадро и закон Авогадро; нормальные условия; молекулярная масса; число Лошмидта.

**Размеры молекул.** Так как размеры молекул очень малы, их невозможно увидеть простым глазом. Самые большие молекулы были сфотографированы при помощи электронного микроскопа. Как показывают самые тонкие опыты, линейные размеры молекулы двухатомного кислорода равны  $4 \cdot 10^{-10}$  м. В общем, линейные размеры молекул лежат в пределах от  $10^{-8}$  до  $10^{-10}$  м.

Следует отметить, что молекулы в свою очередь состоят из атомов. Атомы же состоят из ядра и вращающихся вокруг ядра электронов.

**Масса молекулы.** Массы отдельных молекул очень малы, они определяются специальными приборами — масс-спектрометрами. Например, масса молекулы воды равна  $3 \cdot 10^{-26}$  кг. Поэтому в физике имеют дело не с абсолютным значением массы молекулы, а с безразмерной величиной, относительной массой, что значительно облегчает расчеты. По международному соглашению эталоном, т.е. в качестве единичной атомной массы  $m_0$  принята  $1/12$  часть массы изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ :

$$m_0 = \frac{1}{12} m_c = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Для определения относительной массы  $M_0$  любой молекулы надо абсолютное значение массы молекулы  $m_{\text{моль}}$  разделить на единичную атомную массу  $m_0$ :

$$M_0 = \frac{m_{\text{моль}}}{m_0}.$$

Точно так же, чтобы определить относительную атомную массу  $A_0$ , надо абсолютное значение массы атома  $m_{\text{ат}}$  разделить на единичную атомную массу  $m_0$ :

$$A_0 = \frac{m_{\text{ат}}}{m_0}.$$

**Количество вещества.** Так как вещество состоит из огромного числа молекул и в свою очередь массы молекул различных веществ не равны, то это порождает большие трудности при их сравнении. Именно для того чтобы преодолеть эту трудность, вводится понятие количества вещества, содержащего в своем составе одинаковое число  $N_A$  молекул. Количество вещества —

эта величина, определяемая отношением числа молекул в веществе  $N$  к числу молекул  $N_A$  в 0,012 кг углерода. Количество вещества выражают в молях. *Один моль — это количество вещества, в котором содержится столько же молекул, сколько молекул содержится в углероде массой 0,012 кг.*

**Число Авогадро.** Как было сказано выше, в одном моле любого вещества содержится одно и то же число молекул. Это число называется постоянной Авогадро. Теперь определим, чему равна постоянная Авогадро. Для этого воспользуемся определением количества вещества, т.е. в 0,012 кг углерода содержится  $N_A$  молекул:

$$N_A = \frac{0,012}{m_c} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1},$$

где  $m_c$  — масса молекулы углерода.

Согласно определению массы единичного атома

$$m_c = 12 \cdot m_0.$$

Таким образом,

$$N_A = \frac{0,012 \text{ кг}}{12 m_0} \text{ моль}^{-1} = \frac{0,012 \text{ кг}}{12 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} \cdot \text{моль}^{-1} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1},$$

т.е. в одном моле любого вещества содержится  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$  молекул.

**Закон Авогадро.** Какой объем занимает 1 моль любого газа? На этот вопрос дает ответ закон Авогадро (1776—1856): при одинаковых температурах и давлении один моль любого газа занимает один и тот же объем. При нормальных условиях этот объем равен

$$V_0 = 22,41 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}.$$

**Нормальные условия.** Нормальные условия: давление равно нормальному атмосферному давлению  $p = 101325 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$  и температура равна  $T = 273,15 \text{ К}$ , или  $t = 0^\circ \text{С}$ .

**Молярная масса.** Часто приходится пользоваться понятием молярная масса ( $M$ ). Молярной массой называют массу вещества, взятую в количестве одного моля:

$$M = m_{\text{моль}} \cdot N_A.$$

Единица молярной массы в СИ — кг/моль:

$$[M] = [m] \cdot [N_A] = 1 \text{ кг} \cdot \frac{1}{\text{моль}} = 1 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

Масса  $m$  любого количества вещества равна произведению молярной массы вещества на количество вещества (молярное число) и:

$$m = \nu \cdot M.$$

**Число Лошмидта.** При нормальных условиях число молекул в  $1 \text{ м}^3$  газа определяется числом Лошмидта. Известно, что в 1 моле газа содержится  $N_A$  молекул и 1 моль газа при нормальных условиях занимает объем  $V_0$ . Тогда при нормальных условиях в  $1 \text{ м}^3$  любого газа содержится

$$N_L = \frac{N_A}{V_0} = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}}{22,4 \cdot 10^{-3} \text{ моль}^{-1} \cdot \text{м}^3} = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3} \text{ молекул.}$$



### Вопросы для самопроверки

1. Что изучает молекулярная физика и термодинамика? 2. На чем основано изучение молекулярной физики? 3. Как можно измерить температуру одной молекулы? 4. Что изучает термодинамика? 5. Знаете ли вы правила, лежащие в основе молекулярно-кинетической теории? 6. Чему равны размеры молекул? 7. Почему в физике имеют дело не с абсолютным значением массы молекулы, а с безразмерной относительной величиной? 8. Какая величина принята в качестве единичной массы атома? 9. Как находится относительная масса молекулы? 10. Как находится относительная масса атома? 11. Для чего необходимо было ввести понятие количества вещества? 12. Как определяется количество вещества? 13. Чему равна постоянная Авогадро и какой физический смысл она имеет? 14. В чем заключается закон Авогадро? 15. Как определяется молярная масса? 16. Что называется числом Лошмидта?



### § 3. Идеальный газ и его параметры

**Содержание:** понятие идеального газа; параметры газа; давление газа; закон Дальтона; температура; измерение температуры; шкала температур; абсолютный нуль температуры.

**Идеальный газ.** Как в механике, так и в молекулярной физике используется понятие идеального газа как идеализированной модели, служащей для упрощения расчетов. Идеальным газом называется газ, удовлетворяющий следующим условиям:

- 1) собственный объем молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда, занимаемого газом;
- 2) между молекулами газа отсутствуют силы взаимодействия;
- 3) столкновения молекул газа между собой и со стенками сосуда абсолютно упругие.

Следует отметить, что реальные газы (кислород, гелий) тоже в условиях, близких к нормальным, а также при низких давлениях и высоких температурах по своим свойствам близки к идеальному газу. Кроме того, внося поправки, учитывающие собственный

объем и взаимодействие молекул, можно из законов идеального газа получить законы для реального газа.

**Параметры газа.** Состояние газа характеризуется зависящими друг от друга *параметрами состояния*. Это такие величины, как температура  $T$ , давление  $p$  и объем  $V$ .

Объем газа  $V$  соответствует объему занимаемого им сосуда. Единица объема в СИ —  $\text{м}^3$ :

$$[V] = 1 \text{ м}^3.$$

**Давление газа.** Физическая величина, определяемая отношением нормальной к элементу поверхности силой  $F$  к площади  $S$  этого элемента, называется *давлением*:

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

Единица давления в СИ — паскаль,  $1 \text{ Па} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ .

В настоящее время используются и внесистемные единицы давления: Это

физическая атмосфера =  $1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$   
 техническая атмосфера =  $9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$ .

Молекулы газа, находящиеся в беспорядочном движении, сталкиваются со стенками сосуда и в течение очень маленького промежутка времени действуют на стенку с определенной силой. В результате беспорядочного соударения молекул на единицу поверхности оказывается определенное давление. Приборы, измеряющие давление, называются манометрами и барометрами. В зависимости от назначения манометры бывают разными.

**Закон Дальтона.** Давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений, входящих в смесь газов, т.е.

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n,$$

где  $p_1, p_2, \dots, p_n$  — парциальные давления, которые оказывали бы газы смеси, если бы они одни занимали объем, равный объему смеси при той же температуре.

**Температура.** Для определения степени нагретости тела используется понятие температуры. Если нагретым телом (телом с большей температурой) прикоснуться к ненагретому телу (телу с меньшей температурой), между ними произойдет теплообмен. Энергия от тела с большей температурой будет переходить к телу с меньшей температурой. Этот процесс продолжается до наступления теплового равновесия. Значит, тела, находящиеся в тепловом равновесии, имеют одинаковую температуру. Поэтому температурой называют величину, характеризующую состояние теплового равновесия системы.

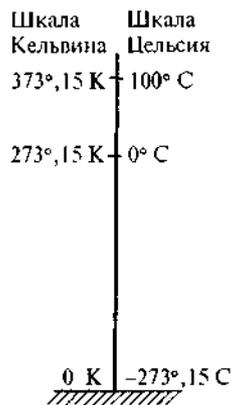


Рис. 50

**Измерение температуры.** Для измерения температуры в качестве эталона используется зависимость объема газа (водород) или жидкости (ртуть, спирт) от изменения температуры. Прибор для измерения температуры называется *термометром*. В повседневной жизни мы хорошо знакомы с термометрами. Например, при помощи ртутного термометра можно измерить температуру от  $-30^{\circ}$  до  $+800^{\circ}$  C. Чтобы внести ясность, при измерении температуры вводится шкала температур (рис. 50).

**Шкала температур.** В соответствии с решением XI Генеральной конференции меры и весов, которая проходила в 1960 году, используются две шкалы температур. По тер-

модинамической шкале температур ( $T$ ) температура измеряется в Кельвинах (K), по Международной практической шкале температур ( $t$ ) температура измеряется в градусах Цельсия ( $^{\circ}$ C). Термодинамическая шкала температур и Международная практическая шкала связаны соотношением

$$T = 273,15 + t.$$

Масштабные единицы в термодинамической и Международной практической шкале температур равны, т. е. разность температур 1K в термодинамической шкале соответствует разности температур  $1^{\circ}$ C в практической шкале температур: единица  $1^{\circ}$ C = единице 1K.

**Абсолютный нуль температуры.** По Международной практической шкале для определения температуры в качестве реперных точек взяли температуру замерзания и закипания воды при нормальных условиях. Затем этот промежуток разделили на 100 равных частей и образовали шкалу температур. Так как эту шкалу первым предложил шведский ученый Цельсий (в 1742 году) она называется шкалой Цельсия. Термодинамическая шкала была предложена английским ученым Кельвином. В качестве начальной точки этой шкалы был принят нуль градус Кельвина  $0K = -273,15^{\circ}$ C (рис. 50).

При этой температуре давление идеального газа будет равно нулю, т. е. молекулы прекратят свое движение. Не существует температуры ниже  $0K$  и вместе с тем нельзя достичь этой температуры.  $0K$  называется *абсолютным нулем температуры*.



**Вопросы для самопроверки**

1. Какой газ называется идеальным газом? 2. Можно ли из законов идеального газа получить законы реального газа? 3. Какие параметры газа вы знаете? 4. Каковы давление газа и единица давления? 5. Какие

- единицы давления, не входящие в Международную систему единиц вы знаете? 6. Какие существуют приборы для измерения давления? 7. В чем заключается закон Дальтона? 8. С какой целью введено понятие температуры и что она характеризует? 9. Как измеряется температура? 10. Какие температурные шкалы вы знаете и чем они отличаются друг от друга? 11. Равны ли масштабные единицы температуры по термодинамической и Международной практической шкалам? 12. Как были выбраны реперные точки Международной практической шкалы температур и кем она была введена? 13. Как были выбраны опорные точки термодинамической шкалы и кем она была введена? 14. Что называют абсолютным нулем температуры? 15. Можно ли достичь абсолютного нуля температуры? А температуры ниже ее?

**§ 38. Силы взаимодействия между молекулами и энергия**

**Содержание:** силы взаимодействия между молекулами; зависимость силы взаимодействия между молекулами от расстояния между ними; зависимость энергии взаимодействия между молекулами от расстояния между ними; агрегатные состояния вещества.

**Силы взаимодействия между молекулами.** Нам известно, что молекулы твердого тела и жидкости с большой силой притягиваются друг к другу. В противном случае они бы разбежались в разные стороны. Точно так же невозможность их сжатия указывает на существование сил отталкивания между их молекулами. Силы взаимодействия между молекулами по природе имеют электромагнитный характер и вместе с тем возникают между электронейтральными молекулами.

**Зависимость силы взаимодействия между молекулами от расстояния между ними.** На рисунке 51 показана зависимость силы взаимодействия двух молекул от расстояния между ними. Между электронами одной молекулы и ядром атома другой молекулы возникают силы притяжения  $F_{пр}$ . Эту силу условно принято считать отрицательной. Также между электронами молекулы и ядрами атомов существует сила отталкивания  $F_{от}$  и эту силу условно принято считать положительной. Равнодействующая этих сил  $F_{равн}$  показана непрерывной линией.

Из графика видно, что при  $r = r_0$   $F_{равн} = 0$ , т. е. сила притяжения и сила отталкивания компенсируют друг друга, и это расстояние считается самым устойчивым состоянием молекул. При  $r > r_0$  преобладает сила притяжения, при  $r < r_0$  преобладает сила отталкивания.

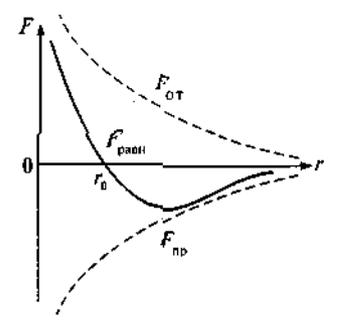


Рис. 51

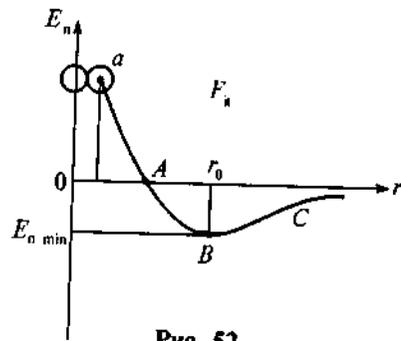


Рис. 52

Другими словами, если тело сжимается и расстояние между молекулами  $r > r_0$ , сила  $F_{\text{равн}}$  препятствует их сближению, а если  $r < r_0$ , то сила  $F_{\text{равн}}$  препятствует их удалению и возвращает молекулы в исходное состояние  $r = r_0$ .

**Зависимость энергии взаимодействия между молекулами от расстояния между ними.** Молекулы взаимодействуют друг с другом и, значит, обладают потенциальной

энергией взаимодействия  $E_n$ . На рисунке 52 показана потенциальная линия зависимости потенциальной энергии взаимодействия молекул от расстояния между ними.

Потенциальная энергия отталкивания молекул считается положительной, а потенциальная энергия притяжения — отрицательной. Потенциальная энергия взаимодействия молекул, находящихся в бесконечности друг от друга, равна нулю, т. е. молекулы не взаимодействуют. По мере приближения их друг к другу потенциальная энергия взаимодействия уменьшается, т. е. начинает принимать отрицательные значения, и при  $r = r_0$  ( $F = 0$ ) достигает своего минимального значения  $E_{n \text{ min}}$  и устойчивого равновесного состояния молекул. Дальнейшее сближение молекул происходит за счет выполнения работы внешних сил против сил отталкивания и приводит к резкому увеличению потенциальной энергии молекул. Часть  $ABC$  на потенциальной линии называется потенциальной ямой.  $E_{n \text{ min}}$  — глубина потенциальной ямы.

Вместе с этим из-за постоянного движения молекул они обладают и кинетической энергией. Отношение между минимальным значением потенциальной энергии взаимодействия молекул  $E_{n \text{ min}}$  и средним значением кинетической энергии  $\langle E_k \rangle$  беспорядочного движения молекул определяет агрегатное состояние вещества:

- 1)  $\langle E_k \rangle \gg E_{n \text{ min}}$  — вещество находится в газообразном состоянии;
- 2)  $\langle E_k \rangle \ll E_{n \text{ min}}$  — вещество находится в твердом состоянии;
- 3)  $\langle E_k \rangle \approx E_{n \text{ min}}$  — вещество находится в жидком состоянии.

**Газообразное состояние вещества.** При  $\langle E_k \rangle \gg E_{n \text{ min}}$  вещество находится в газообразном состоянии, молекулы движутся с очень большой скоростью и находятся на расстояниях, во много раз больших размеров самих молекул. Силы притяжения между молекулами практически равны нулю. Поэтому они двигаются сво-

бодно, занимают весь объем и легко сжимаются. Многочисленные удары молекул об стенки сосуда создают давление газа. При этих ударах стенке передается импульс и в результате возникает давление газа.

**Жидкое состояние вещества.** Молекулы вещества в этом агрегатном состоянии довольно сильно связаны друг с другом. Они, в основном, совершают колебательные движения около определенного положения равновесия. Сила отталкивания между молекулами очень большая, поэтому жидкость невозможно сжать. Но при нагревании жидкости возрастает кинетическая энергия молекул и они могут, преодолев силу притяжения, покинуть жидкость (испариться). Основное свойство жидкости — это ее текучесть, причиной этому является свойство молекул жидкости меняться местами. Поэтому жидкость обладает текучестью и может принимать форму сосуда.

**Твердое состояние вещества.** Это агрегатное состояние вещества в отличие от предыдущих состояний имеет постоянную форму и объем. Молекулы располагаются в узлах кристаллической решетки и крепко связаны друг с другом. Сила притяжения настолько сильная, что молекула не может заметно удалиться от соседней молекулы, только может совершать колебательное движение около положения равновесия. В зависимости от строения кристаллической решетки свойства и форма твердого тела могут быть различными. В природе наряду с кристаллическими твердыми телами встречаются и аморфные твердые тела. Аморфное состояние твердого тела считается неустойчивым состоянием, молекулы располагаются беспорядочно.

**Плазменное состояние вещества.** О плазме иногда говорят как о четвертом агрегатном состоянии вещества. Плазма — это полностью ионизованное состояние вещества. При нагревании газа до очень высокой температуры молекулы полностью разделяются на положительные и отрицательные ионы. Такие условия существуют на Солнце и на других звездах.

Теперь познакомимся с некоторыми явлениями, доказывающими, что вещества состоят из большого числа беспорядочно движущихся молекул.

**Броуновское движение.** В 1827 году английский ботаник Р. Броун в микроскопе наблюдал беспорядочное движение частиц твердого тела.

Броуновское движение — это тепловое движение взвешенных в жидкостях (или в газе) частиц. Чем меньше будут размеры частицы и чем выше температура, тем быстрее будут двигаться частицы. Причина, порождающая броуновское движение, — это непрерывное беспорядочное движение молекул жидкости или

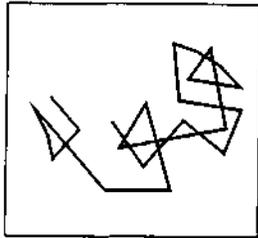


Рис. 53

газа. Молекулы со всех сторон беспорядочно ударяются об частицу и приводят ее в движение.

Если размеры частицы большие и ударов, получаемых молекулой со всех сторон, очень много, тогда импульс, получаемый частицей в результате этих ударов, равен нулю или будет близок к нему; в результате частица не сдвинется со своего места.

Если размеры частицы будут очень маленькими, сумма импульсов, получаемых со всех сторон, не может быть равна нулю, так как число ударов не одинаково. Пусть импульс молекул, ударяющихся в одну сторону будет больше импульса молекул, ударяющихся в другую сторону. Тогда частица придет в движение и через определенное время в результате новых ударов направление движения частицы может измениться. Если наблюдать за движением частицы, то появится картина, изображенная на рисунке 53.

**Диффузия.** Проникновение молекулы одного вещества внутрь другого вещества называется *диффузией*. Если пахнущее вещество вроде эфира, керосина, нафталина, одеколona внести в помещение, то через некоторое время все помещение будет пахнуть этим веществом. Это доказывает, что молекулы одного вещества без воздействия внешних сил проникают в другое вещество. Как показывают опыты, скорость процесса протекания диффузии зависит от характера веществ, участвующих в диффузии, и от температуры. Диффузия в жидкостях происходит медленнее, чем в газах, но быстрее, чем в твердых телах. Чем больше будет плотность тела, тем ближе друг к другу располагаются молекулы и тем труднее молекулам другого вещества проникать в это вещество.



### Вопросы для самопроверки

1. Почему молекулы твердых тел и жидких не разлетаются в разные стороны? 2. Как можно определить, притягиваются или отталкиваются молекулы в веществе? 3. Как возникают силы притяжения и как они зависят от расстояния? 4. Как возникают силы отталкивания и как они зависят от расстояния? 5. В чем заключается зависимость потенциальной энергии взаимодействия между молекулами от расстояния между ними? 6. Какая потенциальная энергия считается положительной, а какая отрицательной? 7. Когда потенциальная энергия ниже минимального значения? 8. Какое состояние называют состоянием устойчивого равновесия молекулы? 9. Каковы характерные признаки газообразного состояния вещества? 10. Как определяется потенциальная яма? 11. Каковы характерные признаки твердого состояния? 12. Каковы характерные признаки жидкого состояния? 13. Что представляет

собой плазма? 14. Что показывает Броуновское движение? 15. Каковы причины возникновения Броуновского движения? 16. Что называют диффузией? 17. Зависит ли диффузия от температуры?

## §39. Опытные законы идеального газа. Уравнения Клапейрона—Менделеева

**Содержание:** понятие о изопроцессах; закон Бойля—Мариотта; закон Гей—Люссака; закон Шарля; уравнение состояния; уравнение Клапейрона; уравнение Клапейрона—Менделеева; значение молярной универсальной газовой постоянной; уравнение Клапейрона—Менделеева для любого количества газа; постоянная Больцсмана.

**Изопроцессы.** Выше мы говорили, что состояние идеального газа определяется тремя термодинамическими параметрами: температурой  $T$ , давлением  $p$ , объемом  $V$ . Изменение хотя бы одного из этих параметров приводит к изменению хотя бы одного из двух других параметров. С целью упрощения изучения процессов в системе один из параметров оставим без изменения (изопроцессы) и рассмотрим связь между двумя другими. Эти законы были открыты опытным путем еще до создания молекулярно-кинетической теории. Поэтому они называются законами идеального газа, полученного опытным путем.

**Закон Бойля—Мариотта.** Для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления газа на его объем есть величина постоянная; т. е. при  $m = \text{const}$ ,  $T = \text{const}$

$$p \cdot V = \text{const}. \quad (39.1)$$

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянной температуре называется *изотермическим*. Кривая, изображающая зависимость между величинами  $p$  и  $V$ , характеризующими свойство вещества при постоянной температуре, называется *изотермой*. Изотермы представляют собой гиперболы, расположенные на графике тем выше, чем выше температура (рис. 54).

**Закон Гей—Люссака.** Объем данной массы газа при постоянном давлении изменяется линейно с температурой, т. е. при  $p$ ,  $m = \text{const}$ ,  $p = \text{const}$

$$V = V_0(1 + \alpha t), \quad (39.2)$$

где  $t$  — температура по шкале Цельсия,  $V_0$  —

объем газа при  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha = \frac{1}{273,15} \text{K}^{-1}$  — коэффициент. Процесс изменения состояния термодинамической системы при посто-

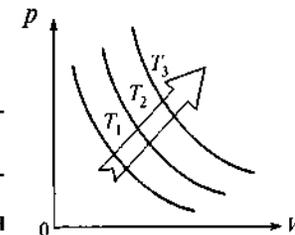


Рис. 54

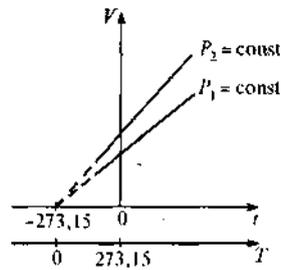


Рис. 55

янном давлении называют *изобарным*. График зависимости  $V$  от  $t$  называют *изобарой* (рис. 55).

Если соотношение между термодинамической и практической шкалой  $T = t + 273,15$  записать в следующем виде:

$$t = T - 273,15 = T - \frac{1}{\alpha} \quad (39.3)$$

и подставить в уравнение (39.2), то получим следующее выражение:

$$V = V_0 \left[ 1 + \alpha \left( T - \frac{1}{\alpha} \right) \right] = V_0 \alpha T. \quad (39.4)$$

Из этого выражения видно, что при  $T = 0$ ,  $V = 0$ , т. е. газ как бы не имеет объема. Это показывает, что закон Гей—Люссака не выполняется при низких температурах. Поэтому изобары при низких температурах показаны прерывистыми линиями.

Закон Гей—Люссака можно записать и в таком виде:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (39.5)$$

**Закон Шарля.** Давление данной массы газа при постоянном объеме изменяется линейно, с температурой, т. е. при  $m = \text{const}$ ,  $V = \text{const}$ :

$$p = p_0 (1 + \alpha t), \quad (39.6)$$

где  $p_0$  — давление газа при  $t = 0^\circ \text{C}$ .

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном объеме называется *изохорным*. График зависимости  $V$  от  $t$  называют *изохорой* (рис. 56).

Теперь с помощью выражения (39.3) изменим выражение (39.6) и получим выражение

$$p = p_0 \left[ 1 + \alpha \left( T - \frac{1}{\alpha} \right) \right] = p_0 \alpha T. \quad (39.7)$$

При  $T = 0$   $p = 0$ , т. е. давление газа будет равно нулю. Значит, при абсолютном нуле температуры молекулы газа прекращают свое движение.

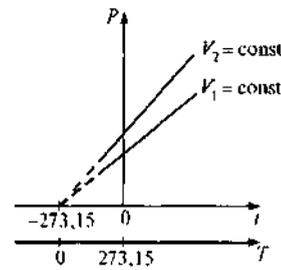


Рис. 56

Закон Шарля можно написать и в следующем виде:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (39.8)$$

**Уравнение состояния.** Выше мы рассматривали связь между двумя параметрами газа, когда один из параметров газа оставался постоянным. Теперь рассмотрим случай, когда изменяются все три параметра газа. В общем виде такое уравнение дается выражением

$$f(p, V, T) = 0$$

и называется *уравнением состояния*.

**Уравнение Клапейрона.** Французский физик Б. Клапейрон (1799—1864) вывел уравненные состояния для идеального газа, объединив законы Бойля—Мариотта и Гей—Люссака. В соответствии с этим уравнением для данной массы газа отношение произведения давления газа на объем к абсолютной температуре есть величина постоянная:

$$\frac{p \cdot V}{T} = B = \text{const}. \quad (39.9)$$

Уравнение (39.9) называется уравнением Клапейрона.  $B$  — газовая постоянная, различная для разных газов.

**Уравнение Клапейрона—Менделеева.** Русский ученый Д.И. Менделеев (1834—1907), используя молярный объем  $V_m$ , написал уравнение Клапейрона для одного моля газа. Согласно закону Авогадро один моль любого газа при данном давлении и температуре занимает один и тот же объем  $V_m$ . Значит, когда  $p$  и  $T$  имеют одинаковые значения, то для любого газа  $V_m$  имеет одно и то же значение, тогда и отношение  $\frac{pV_m}{T}$  для любого газа должно иметь

одно и то же значение. Это отношение обозначим так:

$$\frac{pV_m}{T} = R, \quad (39.10)$$

где  $R$  — молярная (универсальная) газовая постоянная.

$$pV_m = RT \quad (39.11)$$

— это уравнение называется уравнением Клапейрона—Менделеева.

**Значение молярной (универсальной) газовой постоянной.** Для нахождения численного значения молярной (универсальной) газовой постоянной воспользуемся выражением (39.10) и будем считать, что газ находится при нормальных условиях:

$$p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}; T_0 = 273,15 \text{ К}; V_m = 22,41 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}};$$

$$R = \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 22,41 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}}{273,15 \text{ К}} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

**Уравнение Клапейрона—Менделеева для любого количества газа.** Уравнение (39.11) написано для одного моля газа. Чтобы написать его для  $\nu$  молей газа, вместо  $V_m$ , надо подставить его значение, найденное из выражения  $V = \nu V_m$ . Найдем  $V_m$ :

$$V_m = \frac{V}{\nu} \quad (39.12)$$

и, подставив его в уравнение (39.11), получим следующее:

$$p \cdot V = \nu RT = \frac{m}{M} RT. \quad (39.13)$$

Здесь принято, что количество вещества  $\nu = \frac{m}{M}$ .

Выражение (39.13) называется уравнением Клапейрона—Менделеева для любого количества газа.

**Постоянная Больцмана.** Иногда используется другой вид уравнения — уравнение состояния идеального газа. Для этого вводится величина, называемая постоянным Больцмана:

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

На основании этого, (39.11) перепишем в виде

$$p = \frac{R \cdot T}{V_m} = \frac{k \cdot N_A \cdot T}{V_m} = nkT,$$

где  $n = \frac{N_A}{V_m}$  — концентрация молекул, т. е. число молекул в единице объема.

$$p = nkT. \quad (39.13)$$

Из выражения видно, что при данной температуре давление газа прямо пропорционально концентрации молекул.



#### Вопросы для самопроверки

1. Какие процессы называют изопроцессами? 2. В чем заключается закон Бойля—Мариотта? 3. Какой процесс называют изотермическим? 4. Какие линии называют изотермами? 5. Приведите примеры выполнения закона Бойля—Мариотта. 6. В чем заключается закон Гей—Люссака и каковы его виды? 7. Какой процесс называют изобарным? 8. Какие линии называют изобарами? 9. Чему равен объем газа при абсолютном нуле температуры и как это объяснить? 10. В чем заключается закон

Шарля и каковы его виды? 11. Какой процесс называют изохорным? 13. Чему будет равно давление при абсолютном нуле температуры и как это объяснить? 14. Какое уравнение называется уравнением состояния? 15. Выведите уравнение Клапейрона. 16. Выведите уравнение Клапейрона—Менделеева для одного моля газа. 17. Какова молярная газовая постоянная? 18. Выведите уравнение Клапейрона—Менделеева для любого количества газа. 19. Какова постоянная Больцмана? 20. Зависит ли давление газа от концентрации молекулы?



### § 40. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа

**Содержание:** импульс, передаваемый молекулами стенке сосуда; основное уравнение молекулярно-кинетической теории; зависимость среднего значения квадрата скорости молекулы от температуры; зависимость кинетической энергии молекулы от температуры.

**Импульс, передаваемый молекулами стенке сосуда.** Для опыта будем наблюдать беспорядочное движение одноатомного идеального газа. Молекулы практически не сталкиваются друг с другом, столкновения со стенками сосуда будем считать абсолютно упругими. Выделим на стенке сосуда некоторую элементарную площадку  $\Delta S$  (рис. 57) и вычислим давление, оказываемое на эту площадку. Из определения давления

$$p = \frac{F}{\Delta S}. \quad (40.1)$$

Чтобы найти давление, оказываемое на площадку, вычислим импульс силы, получаемый площадкой.

При каждом соударении молекула, направленная перпендикулярно поверхности, меняет свой импульс следующим образом:

$$m_0 v - (-m_0 v) = 2m_0 v, \quad (40.2)$$

где  $m_0$  — масса молекулы,  $v$  — скорость.

**Основное уравнение молекулярно-кинетической теории.** При абсолютно упругом соударении модуль скорости молекулы не меняется, а направление движения меняется на противоположное. Поэтому изменение импульса молекул равно  $2m_0 v$  и в результате площадка  $\Delta S$  получит такой импульс. За время  $\Delta t$  площадка достигнет только те молекулы, которые находятся от нее на расстоянии  $v \cdot \Delta t$  (на рис. 57 область, выделенная цилиндром). Число молекул внутри выделенного цилиндра будет равно  $n \cdot \Delta S \cdot v \cdot \Delta t$ . Здесь  $n$  — концентрация молекул. Теперь определим, сколько молекул будет сталкиваться с площадкой  $\Delta S$ . Для этого рассмотрим направления, по которым могут двигаться молекулы. Из-за изотропности пространства, т. е. из-за равноправия всех его направлений число молекул во всех направлениях будет одинаково-

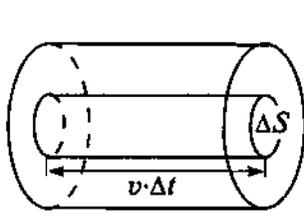


Рис. 57

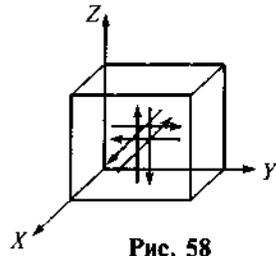


Рис. 58

вым, т.е.  $\frac{1}{3}$  часть будет двигаться по оси  $z$ ,  $\frac{1}{3}$  — по оси  $y$  и  $\frac{1}{3}$  — по оси  $x$ .

Причем, половина из этих молекул будет двигаться вдоль оси в одну сторону, а другая половина — в противоположном направлении (рис. 58). Таким образом, в выделенном цилиндре на рисунке 57 только часть молекул  $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} \cdot n \cdot \Delta S \cdot v \cdot \Delta t$  достигнет элементарной площадки  $\Delta S$ , столкнется с ней и передаст импульс  $2m_0v$ . В результате импульс силы, полученный элементарной площадкой  $\Delta S$ , будет равен

$$\Delta p = F \cdot \Delta t = \frac{1}{6} \cdot n \cdot \Delta S \cdot v \cdot \Delta t \cdot 2m_0v = \frac{1}{3} nm_0v^2 \Delta S \cdot \Delta t. \quad (40.3)$$

Если отсюда найдем силу, которую получает элементарная площадка  $\Delta S$  в результате удара молекул, и подставим в (40,1), то получим следующее:

$$p = \frac{\frac{1}{3} nm_0v^2 \cdot \Delta S}{\Delta S} = \frac{1}{3} nm_0v^2. \quad (40.4)$$

Если в выделенном объеме число молекул будет равно  $N$  и скорости будут  $v_1, v_2, \dots, v_n$ , тогда в (40.4) целесообразно будет подставить среднее значение квадрата скорости:

$$p = \frac{1}{3} nm_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2. \quad (40.5)$$

Выражение (40.5) называется *основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа*.

**Зависимость среднего значения квадрата скорости от температуры.** С учетом выражения для концентрации молекул  $n = \frac{N}{V}$  перепишем (40.5):

$$p = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2,$$

или

$$pV = \frac{1}{3} N \cdot m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 = \frac{1}{3} m \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 = \frac{2}{3} E, \quad (40.6)$$

где  $m = N \cdot m_0$  — масса всех молекул.

Если бы мы имели дело только с одним молем газа, то могли бы взять  $V = V_m$ ,  $m = M$ , т.е.

$$p \cdot V_m = \frac{1}{3} M \langle v_{\text{кв}} \rangle^2.$$

Из уравнения Клапейрона—Менделеева  $pV_m = RT$ . Значит,

$$RT = \frac{1}{3} M \langle v_{\text{кв}} \rangle^2$$

или

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3RT}{m_0 \cdot N_A}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}. \quad (40.8)$$

Выражение (40.8) показывает зависимость скорости молекул от температуры. Например, при комнатной температуре скорость молекулы кислорода равна 480 м/с, а водорода 1900 м/с.

**Зависимость кинетической энергии молекулы от температуры.** Среднее значение кинетической энергии поступательного движения одной молекулы идеального газа определяется выражением

$$\langle E_0 \rangle = \frac{m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2}{2}. \quad (40.9)$$

Если воспользоваться средним значением квадрата скорости (40.8), получим

$$\begin{aligned} \langle E_0 \rangle &= \frac{m_0}{2} \cdot \frac{3kT}{m_0} = \frac{3}{2} kT, \\ \langle E_0 \rangle &= \frac{3}{2} kT. \end{aligned} \quad (40.10)$$

Из этого уравнения следует, что при  $T = 0$ ,  $\langle E_0 \rangle = 0$ , т.е. при 0 К прекращается поступательное движение молекул газа, а следовательно давление газа будет равно нулю. Таким образом, термодинамическая температура является мерой средней кинетической энергии поступательного движения молекул идеального газа. Чем выше будет температура газа, тем выше будет скорость молекул, а, значит, и кинетическая энергия.



#### Вопросы для самопроверки

1. Чему равен импульс, передаваемый молекулой на стенку сосуда?
2. Каково основное уравнение молекулярно-кинетической теории газа?
3. Какова зависимость от температуры средней квадратич-

ной скорости молекулы? 4. Какова зависимость от температуры средней кинетической энергии молекулы? 5. Чему будет равно значение средней кинетической энергии молекулы при абсолютном нуле? 6. Мерой чего является температура идеального газа?



### Образцы решения задач

**Задача 1.** Определите количество вещества  $\nu$  и число молекул  $N$  азота массой  $m = 0,2$  кг.

**Дано:**  
 $m = 0,2$  кг;  
 $N_2$   
 $\nu = ?$   
 $N = ?$

**Решение.** Количество вещества определим из выражения

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

Для азота  $M = 28 \cdot 10^{-3}$  кг/моль.  
 Число молекул в веществе можно найти из выражения

$$N = \nu \cdot N_A,$$

где  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> — число Авогадро. Используя значение массы, находим:

$$\nu = \frac{0,2}{28 \cdot 10^{-3}} \text{ моль} = 7,14 \text{ моль};$$

$$N = 7,14 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ шт.}$$

Ответ:  $\nu = 7,14$  моль;  $N = 4,30 \cdot 10^{24}$  шт.

**Задача 2.** В баллоне находится азот под давлением 2 мПа и температуре  $T = 400$  К. Найти плотность  $\rho$  азота.

**Дано:**  
 $p = 2$  мПа =  $2 \cdot 10^{-3}$  Па;  
 $T = 400$  К.  
 $\rho = ?$

**Решение.** Напишем уравнение состояния идеального газа

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

Введя некоторые изменения в это уравнение, получим:

$$\frac{m}{V} = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}.$$

Если учесть, что  $\rho = \frac{m}{V}$  — плотность,

$$\rho = \frac{p \cdot M}{RT},$$

где  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  — молярная постоянная газа.

Учитывая, что молярная масса азота равна  $M = 28 \cdot 10^{-3}$  кг/моль с учетом данных находим:

$$\rho = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг}}{8,31 \cdot 400 \text{ м}^3} = 1,68 \cdot 10^{-8} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Ответ:  $\rho = 1,68 \cdot 10^{-8}$  кг/м<sup>3</sup>.



### Задачи для самостоятельного решения

1. Кислород при нормальных условиях заполняет сосуд объемом 11,21 л. Найти количество вещества  $\nu$  газа и его массу  $m$ . ( $\nu = 0,5$  моль;  $m = 16$  г)
2. Найти молярную массу  $M$  и массу  $m_0$  одной молекулы пищевой соли. ( $M = 58,5 \cdot 10^{-3}$  кг/моль;  $m_0 = 9,72 \cdot 10^{-26}$  кг)
3. В баллоне находится газ при температуре 100 °С. До какой температуры  $t_2$  надо нагреть газ, чтобы давление увеличилось в 2 раза? ( $t_1 = 473^\circ \text{С}$ )
4. В колбе емкостью 240 см<sup>3</sup> находится газ при температуре  $T = 290$  °К и давлении  $p = 50$  Па. Найти количество вещества газа  $\nu$  и концентрацию молекул ( $\nu = 4,98$  моль;  $n = 1,25 \cdot 10^{25}$  м<sup>-3</sup>.)
5. При какой температуре средняя квадратичная скорость атома гелия будет равна второй космической скорости? ( $T = 20,1$  кК)
6. Найти среднюю кинетическую энергию молекулы кислорода при температуре 300 К, [ $\langle E \rangle = 1,24 \cdot 10^{-20}$  Дж.].

### Тестовые вопросы

1. Как называется число молекул в одном моле любого газа и как оно измеряется?
  - А. число Лощмидта —  $2,7 \cdot 10^{25}$  моль<sup>3</sup>.
  - В. число Авогадро —  $6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>.
  - С. постоянная Больцмана —  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.
  - Д. универсальная газовая постоянная —  $8,31 \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$ .
2. При изотермическом процессе...
  - А.  $V$  и  $T$  изменяются;  $p$  не изменяется.
  - В.  $p$  и  $T$  изменяются;  $V$  не изменяется.
  - С.  $p$  и  $V$  изменяются;  $T$  не изменяется.
  - Д. Не будет теплообмена между внешней средой.
  - Е. Изменяются все параметры.
3. Найдите уравнение Клапейрона—Менделеева:
  - А.  $\frac{pV}{T} = \mu$ .
  - В.  $pV = pT$ .
  - С.  $pV = \frac{m}{M} RT$ .
  - Д.  $p = \frac{mRTV}{M}$ .
  - Е.  $pV = \text{const}$ .

4. Какому значению по шкале Цельсия соответствует температура по шкале Кельвина 200 К?

- A.  $-273\text{ }^\circ\text{C}$ .      B.  $-173\text{ }^\circ\text{C}$ .      C.  $-73\text{ }^\circ\text{C}$ .  
D.  $273\text{ }^\circ\text{C}$ .      E.  $73\text{ }^\circ\text{C}$ .

5. Чему равна масса 2 молей воды?

- A. 32 г.      B. 18 г.      C. 16 г.  
D. 36 г.      E. Правильного ответа нет.

6. Как изменится давление газа, если его концентрация уменьшится в 2 раза, а средняя квадратичная скорость увеличится в 4 раза?

- A. Увеличится в 2 раза.      B. Уменьшится в 2 раза.  
C. Увеличится в 8 раз.      D. Уменьшится в 8 раз.  
E. Останется без изменения.

7. Каким должно быть давление и температура при нормальных условиях?

- A. 101325 Па; 273,15 К.      B.  $10^6$  Па;  $0\text{ }^\circ\text{C}$ .  
C. 760 мм рт. ст; 273,15 К.      D. 102326 Па;  $0\text{ }^\circ\text{C}$ .  
E. Правильные ответы А, В, С.

8. Когда вещество будет в газообразном состоянии?

- A.  $\langle E_k \rangle \gg E_{n\min}$       B.  $\langle E_k \rangle \ll E_{n\min}$       C.  $\langle E_k \rangle = E_{n\min}$   
D.  $\langle E_k \rangle \geq E_{n\min}$       E. Правильного ответа нет.

### Основные выводы

#### Основные положения молекулярно-кинетической теории:

1. Все вещества состоят из мельчайших частиц — атомов и молекул;

2. Атомы и молекулы вещества находятся в непрерывном хаотическом движении;

3. Между частицами любого вещества существуют силы взаимодействия: притяжения и отталкивания. Эти силы имеют электромагнитную природу.

Масса молекулы  $m_0 = 1,66 \cdot 10^{-27}$  кг.

Количество вещества — это величина, определяемая отношением числа молекул в веществе  $N$  к числу молекул  $N_A$  в 0,012 кг углерода. В СИ количество вещества выражают в молях.

Число Авогадро: в одном моле любого вещества содержится одно и то же число молекул:  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ .

**Закон Авогадро:** при нормальных условиях 1 моль газа занима-

ет объем  $V_0 = 22,41 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$ .

**Идеальным газом** называется газ, удовлетворяющий следующим условиям:

1. Собственный объем молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда, занимаемом газом.

2. Между молекулами газа отсутствуют силы взаимодействия;

3. Столкновение молекул газа между собой и стенками сосуда абсолютно упругое.

**Параметры газа:** Объем —  $V$ , давление —  $p$  и температура —  $T$ .  
Физическая атмосфера =  $1,013 \cdot 10^5$  Па = 760 мм рт.ст.

Термодинамическая шкала температур и Международная практическая шкала связаны соотношением:

$$T = 273,15 + t.$$

$T = 0$  К называется абсолютным нулем температуры.

1. При  $\langle E_k \rangle \gg E_{n\min}$  вещество находится в газообразном состоянии.

2. При  $\langle E_k \rangle \ll E_{n\min}$  вещество находится в твердом состоянии.

3. При  $\langle E_k \rangle \approx E_{n\min}$  вещество находится в жидком состоянии.

**Закон Бойля—Мариотта:**  $p \cdot V = \text{const}$ .

**Закон Гей—Люссака:**  $V = V_0(1 + \alpha T)$ .

**Закон Шарля:**  $p = p_0(1 + \alpha t)$ .

**Уравнение Клапейрона—Менделеева** для одного моля газа  $pV_m = RT$  и для любого количества газа  $pV = \frac{m}{M} RT$ .

Связь между давлением газа и температурой

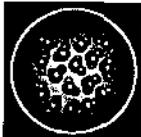
$$p = nkT.$$

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории

$$p = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m_0 \langle v_{\text{кв}}^2 \rangle.$$

Связь кинетической энергии молекулы с температурой

$$\langle E_0 \rangle = \frac{3}{2} kT.$$



## ГЛАВА IX. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Развитие термодинамики в основном связано с изучением коэффициента полезного действия тепловых машин. Французский инженер Сади Карно в своей работе «Мысли о движущейся силе огня» выдвинул идею о том, что производительность тепловых машин зависит не от рабочего вещества, а от разности температур нагревателя и охладителя. В дальнейшем термодинамика получила свое развитие в работах Клапейрона, Джоуля, Клаузиуса, Майера, Томсона и других ученых.

Термодинамика имеет следующие, присущие ей особенности:

- не принимается во внимание, что вещества состоят из атомов;
- используются только величины, присущие макроскопическим системам;
- теория создается, основываясь на результатах опыта;
- свойство веществ выражается в виде характеристики параметров (плотность, гибкость и др.)

При изучении термодинамики следует помнить следующее.

**Термодинамической системой** называется совокупность макроскопических тел, взаимодействующих и обменивающихся энергией друг с другом и с внешними телами.

Основа термодинамического метода — нахождение значений параметров, определяющих состояние системы.

Совокупность физических величин, однозначно определяющих состояние термодинамической системы, называют *термодинамическими параметрами*, или параметрами состояния. Обычно в качестве параметров состояния выбирают температуру, давление и удельный объем.

**Термодинамические параметры.** *Температура* — физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы.

*Давление* — физическая величина, определяемая силой, действующей со стороны газа или жидкости на единицу площади поверхности перпендикулярно к ней.

*Удельный объем* — объем единичной массы. Эта величина об-

ратная плотности:  $v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$ .

Единица в СИ —  $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ ,  $[v] = \frac{[V]}{[m]} = \frac{1 \text{ м}^3}{1 \text{ кг}} = 1 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ .

**Термодинамические процессы.** Если состояние термодинамической системы не меняется со временем, тогда макроскопическая система находится в термодинамическом равновесии. В термодинамике рассматриваются только равновесные состояния.

Изменение хотя бы одного термодинамического параметра термодинамической системы называется *термодинамическим процессом*. При термодинамическом процессе система из начального состояния через промежуточные состояния переходит в конечное состояние. Этот переход может быть обратимым и необратимым.

**Обратимые и необратимые процессы.** Обратимым называется процесс, при котором система возвращается из конечного состояния в начальное, проходя все промежуточные состояния, при этом в окружающей среде не происходит никаких изменений. Колебание тяжелого маятника, подвешенного на длинной нити, близко к обратимым процессам. В этом случае кинетическая энергия на практике полностью переходит в потенциальную энергию. Также уместно и обратное. Из-за того, что сопротивление среды небольшое, амплитуда колебания уменьшается медленно и процесс колебания длится долго.

Любой процесс, встречающий определенное сопротивление, в том числе передача тепла от более горячего тела к более холодному, будет необратимым. На практике все реальные процессы — необратимые.



### § 41. Внутренняя энергия системы и равномерное распределение внутренней энергии по степеням свободы

**Содержание:** внутренняя энергия, степень свободы молекул; внутренняя энергия идеального газа.

**Внутренняя энергия.** Термодинамическая система состоит из множества молекул и атомов и обладает определенной внутренней энергией  $U$ . *Внутренней энергией* термодинамической системы называется совокупность энергий взаимодействия молекул и энергии их теплового движения.

Внутренняя энергия является однозначной функцией состояния термодинамической системы, т.е. каждому состоянию системы соответствует определенное значение внутренней энергии, она абсолютно не зависит от того, каким образом система пришла в это состояние. Если газ нагревать, то увеличится скорость атомов и молекул, что приводит к возрастанию внутренней энергии системы. Если изменить давление или удельный объем, это тоже приводит к изменению внутренней энергии, так как изменяется расстояние между молекулами, значит, изменяется их потенциальная энергия взаимодействия.

Обычно считается, что внутренняя энергия при  $T = 0 \text{ К}$  рав-

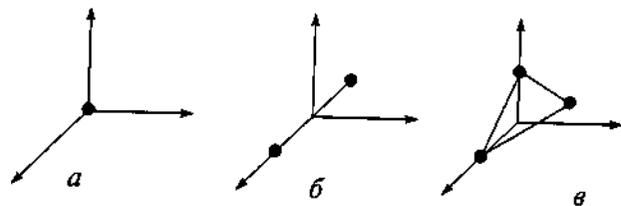


Рис. 59

на нулю, но это не представляет особого интереса. Так как представляет интерес изменение внутренней энергии  $\Delta U$  при переходе системы из одного состояния в другое.

**Степень свободы молекул.** Степенью свободы молекулы называют не связанное друг с другом общее число координат, необходимое для полного определения места молекул в пространстве.

Молекула одноатомного газа имеет три степени свободы поступательного движения:  $i = i_{\text{пост}} = 3$  (рис. 59 а).

Двухатомная молекула имеет три степени свободы поступательного и две степени свободы вращательного движения:  $i_{\text{пост}} = 3$ ,  $i_{\text{вр}} = 2$  (рис. 59 б).

Может вращаться вокруг двух свободных осей:  $i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вр}} = 5$ .

Трехатомная молекула имеет три степени свободы поступательного и три степени свободы вращательного движения:  $i_{\text{пост}} = 3$ ,  $i_{\text{вр}} = 3$  (рис. 59 в).

Трехатомный газ может вращаться вокруг всех трех осей:  $i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вр}} = 6$ .

Независимо от того, сколько степеней свободы будет у молекул, три из них обязательно будут поступательными. Все степени свободы поступательного движения равносильны и каждой из них соответствует одна и та же энергия  $\frac{1}{3} \langle E_0 \rangle$ :

$$\langle E_i \rangle = \frac{\langle E_0 \rangle}{3} = \frac{1}{2} kT. \quad (41.1)$$

Здесь мы воспользовались выражением (40.10) для  $\langle E \rangle$ . В классической физике уместен закон Больцмана о равномерном распределении энергии по степеням свободы молекул. Согласно этому закону на каждую поступательную и вращательную степень свободы статической системы, находящейся в термодинамическом равновесии, приходится  $\frac{1}{2} kT$  энергии. Значит, средняя энергия молекулы

$$\langle E \rangle = \frac{i}{2} kT, \quad (41.2)$$

где  $i$  — полная степень свободы молекулы.

**Внутренняя энергия идеального газа.** Так как молекулы идеального газа не взаимодействуют друг с другом, их потенциальные

энергии равны нулю. Значит, внутренняя энергия идеального газа равна сумме кинетических энергий молекул. Чтобы найти внутреннюю энергию  $I$  моля газа, надо среднюю кинетическую энергию  $\langle E \rangle$  одной молекулы умножить на число молекул  $N_A$ :

$$U_m = \frac{i}{2} kT \cdot N_A = \frac{i}{2} RT, \quad (41.3)$$

здесь учтено, что  $k \cdot N_A = R$ .

Внутреннюю энергию любого количества идеального газа находим следующим образом:

$$U = \nu U_m = \frac{m}{M} U_m = \frac{m}{M} \frac{i}{2} RT = \nu \frac{i}{2} RT, \quad (41.4)$$

где  $M$  — молярная масса,  $\nu$  — количество вещества.



### Вопросы для самопроверки

1. Что способствовало быстрому развитию термодинамики? 2. Какие свойства присущи термодинамике? 3. Что называют термодинамической системой и какими параметрами она характеризуется? 4. Какие величины называют термодинамическими? 5. В чем заключается основа термодинамического метода? 6. Что такое температура? 7. Как определяется давление? 8. Как определяется удельный объем? 9. Какое состояние называют состоянием термодинамического равновесия? 10. Что называют термодинамическим процессом? 11. Какой процесс называют обратимым процессом? 12. Какой процесс называют необратимым процессом? 13. Как определяется внутренняя энергия термодинамической системы? 14. Когда внутренняя энергия системы будет равна нулю? 15. Приводит ли изменение параметров системы к изменению внутренней энергии? 16. Что называют степенью свободы молекулы? 17. Сколько степеней свободы бывает у одно-, двух-, трехатомных газов? 18. Какая энергия приходится на одну степень свободы поступательного движения? 19. В чем заключается закон Больцмана о равномерном распределении энергии по степеням свободы молекул? 20. Чему равна потенциальная энергия взаимодействия молекул идеального газа? 21. Чему равна внутренняя энергия одного моля идеального газа? 22. А внутренняя энергия любого количества газа?



**Содержание:** работа, совершаемая при изменении объема газа; теплообмен:

**Работа, совершаемая при изменении объема газа.** Ознакомимся с работой, совершаемой против внешних сил при изменении объема газа. Пусть в сосуде, имеющем форму цилиндра, под поршнем находится газ (рис. 60).

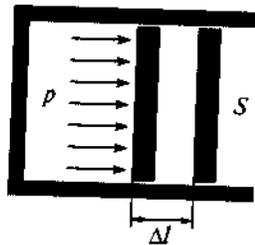


Рис. 60

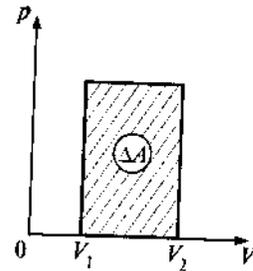


Рис. 61

При расширении газа поршень сдвигается на бесконечно малое расстояние  $\Delta l$ . Считая, что изменение объема очень маленькое, давление остается постоянным ( $p = \text{const}$ ). Теперь вычислим работу, совершаемую при расширении газа:

$$A = F \cdot \Delta l = p \cdot S \cdot \Delta l = p \cdot \Delta V, \quad (42.1)$$

где  $F = p \cdot S$  и  $S \cdot \Delta l = \Delta V$  учтено, что при расширении газа объем изменяется. Совершенную работу изобразим графически. На рисунке 61 она показана заштрихованной площадью. В результате совершения газом работы против внешних сил его внутренняя энергия уменьшается, т.е. увеличивается объем, а также среднее расстояние между молекулами, что в свою очередь приводит к уменьшению энергии взаимодействия.

Когда газ расширяется, его внутренняя энергия уменьшается, внутренняя энергия тратится на совершение работы против внешних сил, т.е. для смещения поршня.

Когда газ сжимается за счет совершения работы внешних сил, его внутренняя энергия возрастает.

**Теплообмен.** Приведем в соприкосновение друг с другом два тела с различной температурой. Через определенное время происходит уравнивание их температур. У горячего тела температура понижается, а у холодного тела температура повышается. Кинетическая энергия беспорядочного движения молекул одного тела переходит в кинетическую энергию беспорядочного движения молекул другого тела.

Процесс передачи внутренней энергии без совершения механической работы называется *теплообменом*. Количество теплоты является мерой энергии, которую тела получают или отдают при теплообмене.

Теплота и работа — это не вид энергии, а форма ее передачи. Они существуют только в процессе передачи энергии.

При передаче тепла телу его внутренняя энергия возрастает, т.е. возрастает энергия беспорядочного движения молекул.

В СИ за единицу количества теплоты принимается, как и для работы и энергии, джоуль (Дж). До введения СИ в качестве единицы количества теплоты использовалась *калория*.

1 калория — это количество теплоты, необходимое для нагревания 1 г дистиллированной воды на  $1^\circ \text{C}$ , точнее с  $19,5^\circ \text{C}$  до  $20,5^\circ \text{C}$ :  $1 \text{ кал} = 4,19 \text{ Дж}$ .



#### Вопросы для самопроверки

1. Какие методы изменения внутренней энергии знаете? 2. Чему равна работа, совершенная при расширении газа? 3. Как меняется внутренняя энергия газа при его расширении? 4. Как меняется внутренняя энергия газа при его сжатии? 5. Равно ли изменение внутренней энергии газа при его сжатии работе, совершенной внешними силами? 6. Какой процесс называется теплообменом? 7. При каких условиях существуют теплота и работа? 8. Какова единица количества теплоты в СИ?



#### § 43. Теплоемкость. Удельная теплоемкость. Уравнение теплового баланса

**Содержание:** теплоемкость; удельная теплоемкость; единицы теплоемкости в СИ; уравнение теплового баланса.

**Теплоемкость.** Два тела одинаковой массы, сделанные из разных веществ, нагреем до одинаковой температуры. Через некоторое время, измерив их температуры, узнаем, что они не равны. Причиной этому свойство различных веществ накапливать различное количество тепла. Чтобы характеризовать такие свойства вещества, вводится понятие теплоемкости.

Количество теплоты, необходимое для повышения температуры данного тела на 1 К, называют *теплоемкостью* этого тела:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}, \quad (43.1)$$

где  $\Delta T = T_2 - T_1$  — разность между конечной и начальной температурой тела;  $Q$  — количество теплоты.

При остывании тела на 1 К выделяется такое же количество теплоты. Теплоемкость тел, изготовленных из одинаковых веществ, но разной массы, бывает различной. Так как теплоемкость пропорциональна массе, иногда возникает необходимость сравнить теплоемкости тел, изготовленных из различных веществ. Для этого надо знать теплоемкости тел одинаковой массы.

**Удельная теплоемкость.** Удельной теплоемкостью называется количество теплоты, необходимое для изменения температуры 1 кг вещества на 1 К:

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}. \quad (43.2)$$

Из выражения (43.2)

$$C = mc \quad (43.3)$$

теплоемкость равна произведению массы тела на удельную теплоемкость.

Если будет известна удельная теплоемкость вещества, можно определить количество теплоты, необходимое для изменения температуры тела:  $\Delta T = T_2 - T_1$ .

Из (43.2) получаем:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T = c \cdot m (T_2 - T_1). \quad (43.4)$$

Для изменения и сравнения удельной теплоемкости различных веществ используется прибор *калориметр*. В калориметре теплообмен между телами происходит изолированно от внешней среды.

**Единица теплоемкости в СИ —**

$$[C] = \frac{[Q]}{[T]} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ К}} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

**Единица удельной теплоемкости в СИ —**

$$[c] = \frac{[Q]}{[m][T]} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг} \cdot \text{К}} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

**Уравнение теплового баланса.** Рассмотрим способ определения удельной теплоемкости неизвестного тела. Для этого нагретое тело опускают в калориметр с водой. Простой калориметр состоит из металлического стакана с крышкой и помещается на теплоизолирующей подставке во внешний стакан (рис. 62). В результате количество теплоты нагретого тела передается воде и калориметру. Процесс длится до тех пор, пока температуры тела, воды и калориметра не уравниваются. Зная начальную температуру тела  $T_r$ , воды  $T_b$  и калориметра  $T_k$ , удельную теплоемкость воды  $c_b$ , калориметра  $c_k$ , массу тела  $m_r$ , воды  $m_b$ , калориметра  $m_k$  и определив из термометра температуру смеси  $T$ , можно определить удельную теплоемкость тела  $c_r$ .

Количество теплоты, отданное телом  $Q_r$  должно быть равно сумме количеств теплоты, полученных водой  $Q_b$  и калориметром  $Q_k$ :

$$Q_r = Q_b + Q_k. \quad (43.5)$$

Это уравнение называется *уравнением теплового баланса*.

В свою очередь, на основании (43.4)

$$Q_r = c_r \cdot m_r (T_r - T), \quad (43.6)$$

$$Q_b = c_b \cdot m_b (T - T_b), \quad (43.7)$$

$$Q_k = c_k \cdot m_k (T - T_k), \quad (43.8)$$

подставив выражения (43.6), (43.7), (43.8) в (43.5), получим:

$$c_r m_r (T_r - T) = c_b \cdot m_b (T - T_b) + c_k \cdot m_k (T - T_k),$$

из этого находим удельную теплоемкость тела:

$$c_r = \frac{c_b \cdot m_b (T - T_b) + c_k \cdot m_k (T - T_k)}{m_r (T_r - T)}. \quad (43.9)$$

Это выражение дает возможность определить удельную теплоемкость неизвестного тела.



### Вопросы для самопроверки

1. С какой целью вводится понятие теплоемкости? 2. Что называют теплоемкостью тела? 3. При охлаждении тела выделяется такое же количество теплоты, как при нагревании? 4. С какой целью вводится понятие удельной теплоемкости? 5. Что называют удельной теплоемкостью вещества? 6. Какая существует связь между теплоемкостью и удельной теплоемкостью? 7. Как определяется количество теплоты? 8. Что представляет собой калориметр и для чего он используется? 9. В чем измеряется единица теплоемкости в СИ? 10. В чем измеряется единица удельной теплоемкости в СИ? 11. Приведите уравнение теплового баланса. 12. Приведите формулу определения удельной теплоемкости неизвестного тела.



Содержание: первый закон термодинамики; изохорный процесс; изобарный процесс; изотермический процесс; адиабатный процесс.

Содержание: первый закон термодинамики; изохорный процесс; изобарный процесс; изотермический процесс; адиабатный процесс.

В § 42 было изложено, что изменение внутренней энергии системы происходит двумя способами; 1) совершением механической работы; 2) передачей количества теплоты. Теперь попытаемся найти отношения между этими величинами.

**Первый закон термодинамики.** Для этого рассмотрим нагреваемый чайник. Количество теплоты  $Q$ , сообщаемое чайнику, идет на нагревание воды в чайнике, т.е. на увеличение внутренней энергии  $\Delta U$  воды. Когда пары воды поднимают крышку чайника, они совершают работу  $A$  против внешних сил (сила тяжести крышки). Закон сохранения и превращения энергии для этого процесса будет иметь следующий вид:

$$Q = \Delta U + A. \quad (44.1)$$

Это математический вид первого закона термодинамики.

Количество теплоты, сообщаемое системе, идет на увеличение ее внутренней энергии и на совершение ею работы против внешних сил.

Если телу сообщается количество теплоты, то  $Q$  положительное, если у тела отбирается количество теплоты, то  $Q$  имеет отрицательное значение. Кроме того, если тело совершает работу против внешних сил, работа  $A$  будет иметь положительное значение, если внешние силы совершают работу над телом, работа  $A$  будет иметь отрицательное значение.

Первый закон термодинамики показывает невозможность изготовления вечного двигателя (лат. *perpetuum mobile*) первого рода. Нельзя построить периодически действующий двигатель, который совершал бы большую работу, чем количество сообщенной извне энергии. В первом законе термодинамики, который является законом сохранения и превращения энергии, утверждается, что во всех процессах, происходящих в природе, энергия сама по себе не возникает и не исчезает, только переходит из одного вида в другой.

Теперь рассмотрим применение первого закона термодинамики к различным процессам.

**Изохорный процесс.** Объем идеального газа остается постоянным ( $V = \text{const}$ ), изменяется давление и температура. Если объем газа остается постоянным, то против внешних сил работа не совершается, т.е.  $A = 0$ . Тогда первый закон термодинамики принимает следующий вид:

$$Q = \Delta U. \quad (44.2)$$

Значит, количество теплоты, сообщаемое идеальному газу, идет на изменение его внутренней энергии, другими словами, на повышение температуры.

На основании выражения (48.4) получим

$$\Delta U = c \cdot m \cdot \Delta T. \quad (44.3)$$

**Изобарный процесс.** Давление идеального газа остается постоянным ( $p = \text{const}$ ), изменяется объем и температура. Здесь часть количества теплоты, сообщаемого газу, идет на изменение внутренней энергии системы и совершение работы против внешних сил:

$$Q = \Delta U + A. \quad (44.4)$$

Из § 42 мы видели, что работа, совершаемая газом, была равна

$$A = p \cdot \Delta V.$$

**Изотермический процесс.** Температура идеального газа остается постоянной ( $T = \text{const}$ ), изменяется объем и давление. Если

температура газа остается постоянной, значит, его внутренняя энергия тоже остается постоянной:

$$Q = A. \quad (44.5)$$

**Адиабатный процесс.** Процесс в теплоизолированной системе называют *адиабатным*. Примером адиабатного процесса могут быть быстро протекающие процессы. Например, работа, совершаемая при быстром сжатии, идет на повышение температуры, т.е. идет на повышение внутренней энергии. В результате повышения температуры на распространение количества теплоты в окружающую среду необходимо определенное время. Поэтому  $Q = 0$ . Хорошим примером на адиабатный процесс может быть возгорание горючей смеси в двигателе внутреннего сгорания.

Для адиабатного процесса первый закон термодинамики имеет следующий вид:

$$\Delta U + A = 0$$

или

$$A = -\Delta U, \quad (49.7)$$

т.е. при адиабатном процессе работа совершается только за счет изменения внутренней энергии.



#### Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте первый закон термодинамики. 2. Если телу сообщается некоторое количество теплоты, какое значение будет иметь  $Q$ ? А если тело отдает некоторое количество теплоты? 3. Если тело совершает работу против внешних сил, какое значение будет иметь  $A$ ? А если внешние силы совершают работу над телом? 4. Можно ли изготовить *perpetuum mobile* первого рода? 5. Сформулируйте закон сохранения и превращения энергии. 6. Сформулируйте первый закон термодинамики для изохорного процесса. 7. Сформулируйте первый закон термодинамики для изобарного процесса. 8. Сформулируйте первый закон термодинамики для изотермического процесса. 9. Какой процесс называют адиабатным? 10. Является ли адиабатный процесс реальным? 11. Сформулируйте первый закон термодинамики для адиабатного процесса. 12. За счет чего при адиабатном процессе выполняется работа?



#### § 45. Второй закон термодинамики

Содержание: второй закон термодинамики; *perpetuum mobile* второго рода.

Первый закон термодинамики хотя и выражает закон сохранения и превращения энергии, но не может показать, в каком направлении может идти термодинамический процесс. Например, первый закон термодинамики показывает, какой будет

возможность передачи количества теплоты от горячего тела к холодному, такой же будет и возможность передачи теплоты холодного тела горячему. На самом деле возникает вопрос: какие процессы могут происходить в природе? На это дает ответ второй закон термодинамики.

**Второй закон термодинамики.** Есть несколько формулировок второго закона термодинамики, однако мы приведем самую простую из них — формулировку Клазиуса.

**Теплота никогда не может переходить сама собой от тел с более низкой температурой к телам с более высокой температурой.**

На практике бесконечно большое количество теплоты вод Мирового океана само собой может переходить только к телу, у которого температура меньше, чем у воды. Для того чтобы осуществить теплопередачу от холодного тела к более теплому, надо совершить дополнительную работу. Но здесь количество теплоты полностью не превращается в работу — часть ее идет на нагревание окружающей среды. С этой точки зрения следует обратить внимание на формулировку Планка второго закона термодинамики: **невозможен процесс, единственным результатом которого является превращение теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную работу.**

Чтобы теплота превратилась в работу, надо чтобы были и нагреватель и охладитель (холодильник). Во всех тепловых машинах только часть энергии, передаваемая от нагревателя холодильнику, совершает полезную работу. Тогда возникает вопрос, от каких величин зависит производительность тепловых машин и что нужно сделать, чтобы повысить ее. На этот вопрос дает ответ формулировка второго закона, который дал Карно: **коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины определяется только температурой нагревателя и холодильника.**

Законы термодинамики указывают, какие машины можно сделать и на что нужно обратить внимание, чтобы повысить их производительность.

Perpetuum mobile второго рода основывается на идее использования гигантского количества энергии океанической воды без совершения работы. Второй закон термодинамики утверждает, что количество теплоты может переходить само собой только от более горячего тела к более холодному телу, а для обратного процесса надо совершить дополнительную работу. Это в свою очередь показывает невозможность изготовления perpetuum mobile второго рода. Однако если бы это было возможно, то человечество получило бы гигантский источник энергии. Масса воды в Мировом океане составляет примерно  $10^{18}$  кг, при охлаждении которой на  $1^\circ\text{C}$  выделялось бы примерно  $10^{24}$  Дж теплоты, это эквивалентно полному сжиганию  $10^{14}$  т угля. Железнодорожный состав, нагруженный этим количеством угля, растянулся бы на расстояние  $10^{10}$  км, что приблизительно совпадает с размерами Солнечной системы.



### Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается первый закон термодинамики? 2. Может ли первый закон термодинамики показать, в каком направлении может идти термодинамический процесс? 3. В чем заключается второй закон термодинамики? 4. Может ли количество теплоты переходить от более холодного тела к более горячему телу? 5. Может ли в природе быть процесс, где количество теплоты полностью превращается в работу? 6. Какие условия должны выполняться, чтобы тепло превратилось в работу? 7. От чего зависит коэффициент полезного действия в тепловых машинах? 8. В чем заключается идея perpetuum mobile второго рода? 9. Можно ли сделать perpetuum mobile второго рода? 10. Если удастся охладить температуру воды в океане на  $1^\circ\text{C}$ , то какое количество теплоты при этом выделится? 11. Сколько тонн угля надо сжечь, чтобы получить такое количество энергии?



### Содержание: принцип действия тепловой машины. Коэффициент полезного действия тепловой машины. Цикл Карно.

Содержание: тепловая машина; коэффициент полезного действия тепловой машины; цикл Карно; холодильники.

**Из истории тепловых двигателей.** Во второй половине XVIII века развитие промышленности побудило человечество изобрести устройства, повышающие производительность труда. Первый паровой двигатель был создан в 1765 году И. Ползуновым в России. Английский изобретатель Дж. Уатт в 1784 году изобрел паровую машину. Но производительность этих устройств была очень маленькой, и это побудило французского инженера Сади Карно искать пути усовершенствования тепловых двигателей.

**Тепловая машина.** Тепловой машиной называется устройство, которое превращает внутреннюю энергию топлива в механическую энергию. Принцип работы тепловой машины приведен на рисунке 63. В первом цикле от нагревателя, с высокой температурой  $T_1$ , за цикл отнимается количество теплоты  $Q_1$ , а термостату с более низкой температурой  $T_2$ , называемому холодильником, за цикл передается количество теплоты  $Q_2$  и совершается работа  $A = Q_1 - Q_2$ . На

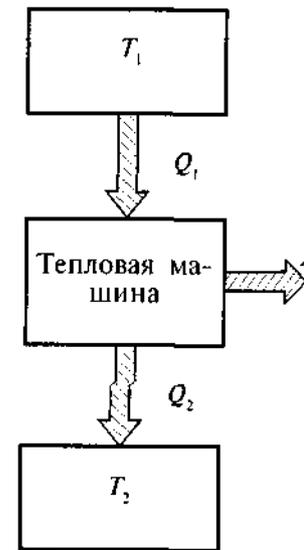


Рис. 63

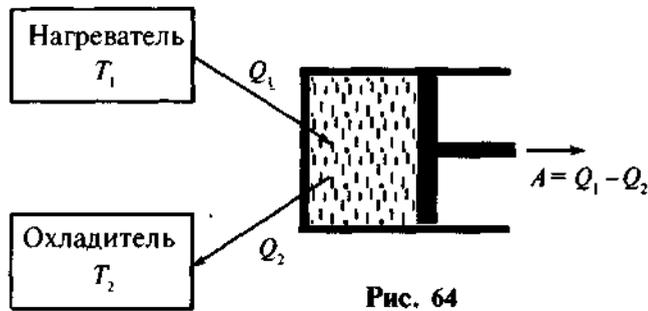


Рис. 64

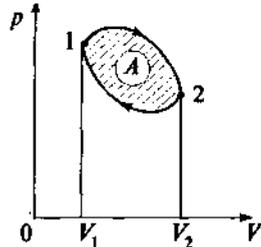


Рис. 65

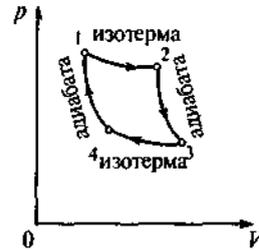


Рис. 66

рисунке 64 показано устройство тепловой машины. Любой двигатель состоит из трех частей: рабочего тела (газ или пар), нагревателя и охладителя (холодильника). Рабочее тело при расширении совершает работу, получая от нагревателя некоторое количество теплоты  $Q_1$ . Температура  $T_1$  нагревателя остается при этом постоянной за счет сжигания топлива. При сжатии рабочее тело передает некоторое количество теплоты  $Q_2$  холодильнику — телу с постоянной температурой  $T_2 < T_1$ . Тепловой двигатель должен работать циклически. *Круговым процессом*, или *циклом*, называется процесс, при котором система, проходя несколько состояний, возвращается в свое исходное состояние (рис. 65). Процесс, протекающий по направлению движения стрелки часов (газ сначала расширяется, а затем сжимается), называется *прямым циклом*, процесс, протекающий в направлении, обратном движению стрелки часов (газ сначала сжимается, а затем расширяется), называется *обратным циклом*. Тепловые машины работают в прямом цикле, а холодильники — в обратном. По завершению цикла рабочее тело возвращается в свое прежнее состояние, т.е. внутренняя энергия будет равна своему первоначальному значению.

**Цикл Карно.** Цикл Карно состоит из двух изотермических и двух адиабатных процессов (рис. 66). В процессе 1—2 идеальный газ за счет количества теплоты ( $Q_1$ ), получаемой от нагревателя, изотермически расширяется и совершает работу. Так как  $T = \text{const}$ , внутренняя энергия газа не изменяется. В процессе 2—3 газ ади-

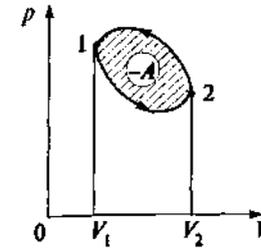


Рис. 67

абатически расширяется и за счет внутренней энергии совершает работу, так как в этом процессе газ не получает количество теплоты. В процессе 3—4 общее количество теплоты  $Q_2$ , выделяющейся при изотермическом сжатии, передается охладителю, так как внутренняя энергия не изменяется. В процессе 4—1 работа, совершенная при адиабатическом сжатии, идет на увеличение внутренней энергии газа.

Таким образом, идеальный газ возвращается в свое исходное состояние и полностью восстанавливает свою внутреннюю энергию. В процессе цикла идеальный газ получает от нагревателя количество теплоты  $Q_1$  и передает охладителю количество теплоты  $Q_2$ . Согласно первого закона термодинамики количество теплоты  $Q_1 - Q_2$  идет на совершение работы и равно площади цикла.

**Коэффициент полезного действия тепловой машины.** Коэффициентом полезного действия (КПД) тепловой машины цикла Карно называется следующая величина:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (46.1)$$

КПД цикла Карно можно выразить также через температуру  $T_1$  нагревателя и  $T_2$  охладителя:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (46.2)$$

Значит, КПД тепловой машины не зависит от вида рабочего тела, но определяется температурой нагревателя и охладителя.

Из выражения (46.1) можно сделать следующие выводы:

- 1) чтобы поднять КПД тепловой машины, надо повысить температуру нагревателя и понизить температуру охладителя.
- 2) КПД тепловой машины всегда меньше единицы.



Рис. 68

В настоящее время все усилия инженеров направлены на повышение КПД тепловых машин. Для этого надо искать пути уменьшения трения между трущимися частями машины, уменьшения потери от неполного сгорания топлива. В настоящее время КПД тепловых машин составляет порядка 40%.

**Охладители.** Как было сказано выше, охладители работают по принципу обратного цикла (рис. 67). За счет совершения работы от системы отнимается определенное количество теплоты. Другими словами, количество теплоты переходит из более холодного тела к более нагретому телу и машина превращается в охладитель (рис. 68). Самый распространенный охладитель — это холодильник.



### Вопросы для самопроверки

1. Какое устройство называется тепловой машиной? 2. На чем основан принцип работы тепловой машины? 3. Каково устройство тепловой машины? 4. Что называют циклом? 5. Какой цикл называют прямым циклом? какой обратным? 6. Какие машины работают в прямом цикле? какие в обратном? 7. Что называют циклом Карно? 8. Чему равна работа, совершаемая в цикле Карно? 9. За счет чего в цикле Карно совершается работа? 10. Что называют коэффициентом полезного действия тепловой машины? 11. Зависит ли КПД от вида рабочего тела? 12. Зависит ли КПД от температуры нагревателя и охладителя? 13. Как поднять КПД тепловых машин? 14. Какие значения принимает КПД тепловых машин? 15. Почему КПД тепловой машины принимает такие маленькие значения? 17. На чем основан принцип работы охладителя? 18. Как осуществляется охлаждение?



**Содержание:** тепловые двигатели; паровая машина; двигатель внутреннего сгорания; карбюраторный двигатель; дизель; реактивный двигатель; охрана окружающей среды.

**Тепловые двигатели.** К тепловым двигателям относятся паровая турбина, двигатели внутреннего сгорания, реактивные двигатели.

**Паровая машина.** В паровых машинах и паровых турбинах роль нагревателя выполняет паровой котел, роль рабочего тела — пар, роль охладителя — атмосфера или устройство охлаждения отработавшего пара — конденсатор.

**Двигатель внутреннего сгорания.** В двигателе внутреннего сгорания роль нагревателя и рабочего тела выполняет топливо, роль охладителя выполняет атмосфера.

Обычно в качестве топлива используется бензин, спирт, керосин и дизельное топливо. С помощью специального устрой-

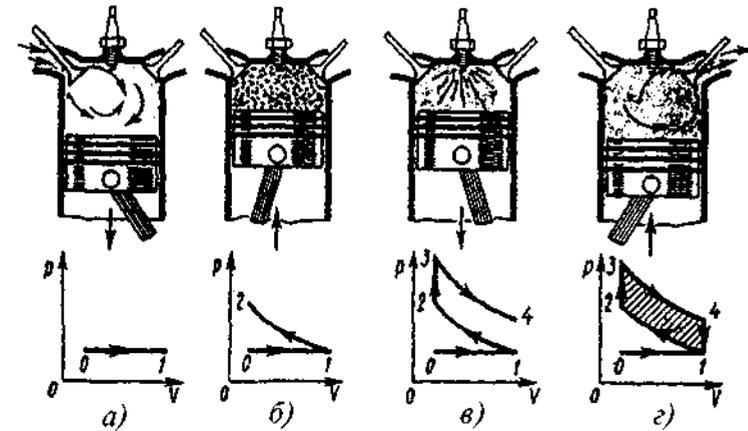


Рис. 69

ства (например, карбюратор в бензиновых двигателях) из топлива и воздуха готовится смесь, которая подается в цилиндр. В цилиндре смесь сгорает. Продукты горения выбрасываются в атмосферу. Теперь подробнее остановимся на некоторых типах двигателей.

**Карбюраторный двигатель.** Рассмотрим принцип работы и рабочую диаграмму четырехтактного двигателя (рис. 69). Когда под действием внешних сил поршень движется вниз (рис. 69 а), открывается входной клапан и рабочая смесь поступает в цилиндр.

Процесс происходит изобарно при атмосферном давлении, когда поршень доходит до крайнего нижнего положения, впускной клапан закрывается, первый такт (впуск) заканчивается: на графике процесс показан линией 0—1. Второй такт (сжатие) (рис. 69 б) тоже происходит под действием внешней силы.

Оба клапана закрыты и газ адиабатически разогревается. На графике это соответствует линии 1—2. В конце третьего такта свеча подает искру (рис. 69 в). Когда поршень достигает крайнего верхнего положения, от искры свечи воспламеняется горючая смесь и давление газа резко возрастает. На графике это соответствует изохорному процессу 2—3. Клапаны закрыты и поршень начинает двигаться вниз, т.е. адиабатически расширяется. Линия 3—4 соответствует такту рабочего хода (рис. 69 г). Видно, что в этом такте давление газа понижается, объем увеличивается, температура также понижается. В этом состоянии совершаемая работа положительная и выполняется за счет уменьшения внутренней энергии газа. Четвертый такт — выпускной (рис. 69 г). Когда поршень достигает крайнего нижнего положения, открывается выпускной клапан, продукты горения через выпускное устройство выпускаются в

окружающую среду. Давление газа понижается и в конце такта становится равно атмосферному. На графике этот изохорный процесс показан линией 1—4. Поршень за счет энергии маховика возвращается в свое верхнее положение и такт заканчивается.

В рассмотренном закрытом процессе совершенная работа будет равна площади штрихованной поверхности, ограниченной линиями процессов. Расширение в части 3—4 происходит относительно сжатия 1—2 при более высоком давлении. Конечно, в результате этого двигатель выполняет полезную работу. В 3—2 и 4—1 изохорных процессах работа равна нулю ( $V = \text{const}$ ) и как было сказано выше, полезная работа определяется разностью адиабатического расширения и сжатия.

На практике КПД двигателей внутреннего сгорания составляет 20—30%. Чтобы повысить КПД двигателей, надо больше сжимать горючую смесь. Но в двигателях внутреннего сгорания горючую смесь нельзя сильно сжимать, так как сжатое горючее может сильно разогреться и самовозгореться. Это нарушает принцип работы двигателя.

**Дизель.** Немецкий инженер Дизель создал двигатель с более высоким КПД. В дизелях степень сжатия горючей смеси намного выше и в конце сжатия температура воздуха может быть настолько высокой, что горючая смесь может воспламениться. Горючее горит не сразу, как в карбюраторных двигателях, а медленно, в течение определенной части движения поршня. Процесс горения горючего происходит по мере увеличения объема рабочей зоны. Поэтому давление газов в течение работы остается постоянной. Таким образом, в дизелях процесс горения смеси происходит при постоянном давлении. В карбюраторных двигателях этот процесс происходит при постоянном объеме. Дизельный двигатель, по сравнению с карбюраторным, экономичнее, КПД тоже значительно выше и составляет почти 40%. Его мощность тоже значительно больше. Наряду с этим дизельный двигатель может работать на более дешевом топливе. Дизель используется в стационарных установках, широко используется на железнодорожном, воздушном и водном транспорте. В настоящее время маломощные дизели широко используются в автомашинах и тракторах.

**Реактивный двигатель.** На рисунке 70 приведена схема реактивного двигателя. Принцип его работы следующий. При полете самолета встречный поток воздуха проходит через сопло, создающее давление, захватывает горючее, разбрызгиваемое форсункой. Образованная горючая смесь поступает в камеру сгорания и искра от свечи поджигает смесь. Газы, образованные в результате горения горючей смеси выбрасываются наружу с большой скоростью через выпускное отверстие — сопло. Горение смеси приводит к

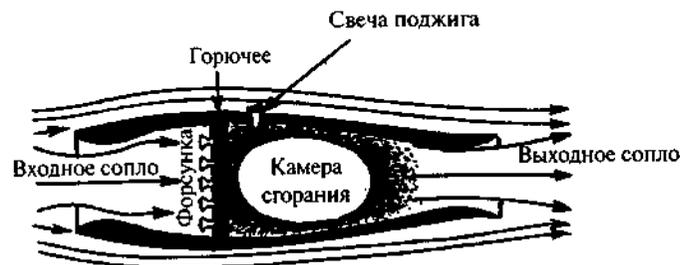


Рис. 70

резкому увеличению давления и в результате скорость газа, выходящего из сопла, будет намного больше скорости газа, входящего в двигатель. Именно из-за разницы этих скоростей в результате закона сохранения импульса создается реактивная сила тяги.

КПД современных тепловых машин может быть от 40% (двигатели внутреннего сгорания) до 60% (реактивные двигатели), поэтому ученые проводят непрерывные изыскания на пути усовершенствования имеющихся двигателей. Наряду с этим непрерывное увеличение двигателей внутреннего сгорания представляет большую опасность для окружающей среды.

**Охрана природы.** Высшее создание природы — человек, а также остальные животные, являются частью этой природы. Для их жизни и развития нужен чистый воздух, чистая вода и чистые продукты. Воздух, которым мы дышим, является смесью газов, составляющих атмосферу Земли. В его составе, кроме кислорода, азота, водорода и естественных газов, содержится еще пыль, дым, частицы соли и другие соединения. Кроме этого, в составе воздуха имеются и промышленные отходы.

Использование в большом количестве тепловых двигателей тоже оказывает негативное влияние на окружающую среду. По подсчетам в настоящее время каждый год сжигается до 1 млрд тонн угля и до 2 млрд тонн нефти. Это в свою очередь может привести к повышению температуры на Земле и в результате создать угрозу таяния ледников и повышения уровня Мирового океана. Кроме этого в атмосферу выбрасывается 120 млн тонн золы и до 60 млн тонн вредных газов.

В мире имеется более 200 миллионов автомобилей, которые отравляют атмосферу окисью углерода (II), азотом и углеводородами. С увеличением мощностей тепловых и атомных электростанций возрастает потребность в воде. Поэтому для предохранения загрязнения воздуха и воды используются непосредственные и косвенные методы очистки.

**Непосредственный метод** — очистка от различных дымов и газов; использование горючих, которые не сильно загрязняют ат-

мосферу: природного газа, серонесодержащей нефти; создание двигателей, работающих не на бензине, и др.

*Косвенные методы* приведут к резкому снижению концентрации ядовитых веществ в нижних слоях атмосферы. Это увеличение высоты выводящих отходы источников с учетом метеорологических условий, использование различных методов распыления в воздухе соединений и др. С целью плодотворного использования земной поверхности и водных запасов — построение электростанций с замкнутым циклом работы.

В настоящее время запрещено строить предприятия без очистных сооружений, тепловые электростанции и другие предприятия, выбрасывающие в воздух золу, пыль, сажу, ядовитые газы. Предприятия, наносящие вред, должны строиться за пределами города. Целесообразно по возможности расширять мероприятия по озеленению.



### Вопросы для самопроверки

1. Что относится к тепловым двигателям? 2. Паровая машина. 3. Двигатель внутреннего сгорания. 4. На чем основан принцип работы двигателя внутреннего сгорания? 5. На чем основан принцип работы карбюраторного двигателя? 6. Объясните рабочую диаграмму карбюраторного двигателя. 7. За счет чего карбюраторный двигатель выполняет полезную работу? 8. Каков КПД двигателя внутреннего сгорания? 9. Какие трудности имеются для повышения КПД двигателя внутреннего сгорания? 10. На чем основан принцип работы дизеля? 11. Чем отличается принцип работы дизеля от принципа работы карбюраторного двигателя? 12. Каков КПД дизеля? 13. Чем достигается повышение КПД дизеля? 14. Какие преимущества имеет дизель? 15. На чем основан принцип работы реактивного двигателя? 16. Как возникает реактивная сила тяги? 17. Каков КПД реактивного двигателя? 18. Загрязняют ли природу двигатели внутреннего сгорания? 19. Приносят ли вред людям, животным и растениям различные отходы? 20. Приводит ли к повышению температуры на Земле использование топлива в больших количествах? 21. Какие меры принимаются для охраны природы? 22. Какие требования учитываются при строительстве промышленных предприятий?



### Образцы решения задач

**Задача 1.** Азот массой 5 кг нагрели до 150 К при постоянном объеме. Найти количество теплоты  $Q$ , переданное азоту, изменение внутренней энергии  $\Delta U$ , работу, совершенную газом.

**Дано:**

$$\begin{aligned} m &= 5 \text{ кг}; \\ \Delta T &= 150 \text{ К}; \\ V &= \text{const}; \\ i &= 5. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q &= ? \\ \Delta U &= ? \\ A &= ? \end{aligned}$$

**Решение:** Если иметь в виду, что  $V = \text{const}$ ;  $A = p \cdot \Delta V$ , то  $\Delta V = 0$ , значит,  $A = 0$ . Тогда для данного процесса первый закон термодинамики принимает вид

$$Q = \Delta U.$$

Изменение внутренней энергии  $\Delta U$  можно найти из следующей формулы:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} R \cdot \Delta T,$$

где  $i = 5$  — степень свободы молекулы азота,  $M = 28 \cdot 10^{-3}$  кг/моль — молярная масса азота,  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  — молярная постоянная газа. Используя данные, находим

$$\Delta U = \frac{5}{2} \cdot \frac{5}{28 \cdot 10^{-3}} \cdot 8,31 \cdot 150 \text{ Дж} = 556,5 \text{ кДж}.$$

Ответ:  $A = 0$ ,  $\Delta U = 556,5$  кДж;  $Q = 556,5$  кДж.

**Задача 2.** Найти работу при изотермическом сжатии газа, если при изотермическом расширении газа совершенная работа равна 8 Дж, КПД цикла Карно 0,4.

**Дано:**

$$\begin{aligned} \eta &= 0,4; \\ A_p &= 8 \text{ Дж}; \\ T &= \text{const}. \end{aligned}$$

$$A_c = ?$$

**Решение:** Составим  $pV$ -диаграмму цикла (рис. 66). Переход 1 — 2 показывает изотермическое расширение газа, переход 3 — 4 показывает изотермическое сжатие. КПД цикла Карно определяется следующим образом:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

где:  $Q_1$  — количество теплоты, полученное газом,  $Q_2$  — количество теплоты, отданное газом охладителю. Работа  $A_p$ , совершенная при изотермическом расширении газа, равна количеству теплоты  $Q_1$ , полученной газом от нагревателя, работа  $A_c$ , совершенная при изотермическом сжатии, равна количеству теплоты  $Q_2$ , отданной газом холодильнику, т.е.

$$Q_1 = A_p; \quad Q_2 = A_c.$$

Отсюда КПД цикла принимает следующий вид:

$$\eta = \frac{A_p - A_c}{A_p}$$

Если отсюда найдем  $A_c$ ,

$$A_c = (1 - \eta)A_p,$$

при помощи данных получаем:

$$A_c = (1 - 0,4) \cdot 8 \text{ Дж} = 4,8 \text{ Дж}.$$

$$\text{Ответ: } A_c = 4,8 \text{ Дж}.$$



### Задачи для самостоятельного решения

1. На сколько изменится внутренняя энергия гелия массой 200 г при увеличении температуры на  $20^\circ\text{C}$ ? ( $\Delta U = 12,5 \text{ Дж}$ )
2. Какую работу совершает кислород массой 320 г при изобарном нагревании на 10 К? ( $A = 830 \text{ Дж}$ )
3. В сосуд, содержащий 1,5 кг воды при  $15^\circ\text{C}$  впускают 200 г водяного пара при  $100^\circ\text{C}$ . Какая общая температура установится после конденсации пара? ( $t = 89^\circ\text{C}$ )
4. Температура нагревателя идеальной тепловой машины  $117^\circ\text{C}$ , а холодильника  $27^\circ\text{C}$ . Количество теплоты, получаемой машиной от нагревателя за 1 с, равно 60 кДж. Вычислить КПД машины, количество теплоты, отдаваемое холодильнику за 1 с, и мощность машины. ( $\eta = 23\%$ ;  $Q_c = 46 \text{ кДж}$ ;  $R = 14 \text{ кВт}$ )

### Тестовые вопросы

1. Среди приведенных формул найдите выражение совершенной газом работы:
 

A. $A = p\Delta V$ .	B. $A = F \cdot \Delta l$ .	C. $A = F \cdot \Delta h$ .
D. $A = Q \cdot U$ .	E. $A = Q \cdot j$ .	
2. При изохорном процессе идеальному газу сообщили тепло 300 Дж. Изменилась ли внутренняя энергия газа?
 

A. Увеличилась на 150 Дж.	B. Увеличилась на 300 Дж.
C. Увеличилась на 200 Дж.	D. Уменьшилась на 200 Дж.
E. Не уменьшилась.	
3. Найдите правильное подтверждение. Количество теплоты, которое необходимо, чтобы изменить температуру 1 кг вещества на 1 К, называется ...
 

A. ... удельной теплотой плавления ...
B. ... удельной теплотой кристаллизации ...

- |                                       |
|---------------------------------------|
| C. ... удельной теплоемкостью ...     |
| D. ... количеством теплоты...         |
| E. ... удельной теплотой сгорания ... |

4. Какова внутренняя энергия 10 молей одноатомного газа при  $27^\circ\text{C}$ ?
 

A. 74,8 кДж.	B. 748 Дж.	C. 075 Дж.
D. 4,3 Дж.	E. Правильного ответа нет.	
5. Какой из приведенных ниже газов при нормальном условии имеет самую большую удельную теплоемкость?
 

A. $\text{O}_2$	B. $\text{H}_2$	C. He.	D. Ne.	E. Fe.
-----------------	-----------------	--------	--------	--------

### Основные выводы

*Термодинамической системой* называется совокупность макроскопических тел, взаимодействующих и обменивающихся энергией друг с другом внешними телами.

Внутренней энергией термодинамической системы называется совокупность энергии взаимодействия молекул и энергии их теплового движения.

Внутренняя энергия идеального газа

$$U_m = \nu \frac{i}{2} RT.$$

Теплоемкость  $C = \frac{Q}{\Delta T}$ . Ее единица в СИ —  $1 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ .

**Первый закон термодинамики:**  $Q = \Delta V + A$ .

**Второй закон термодинамики:** *Невозможно передать теплоту от более холодной системы к более горячей.*

Коэффициент полезного действия цикла Карно:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$



## § 48. Реальный газ. Уравнение состояния реального газа

Как было отмечено в § 38, агрегатное состояние веществ определяется при помощи отношения между минимальным значением потенциальной энергии взаимодействия молекул  $E_{n \min}$  и средним значением кинетической энергии беспорядочного теплового движения  $\langle E_k \rangle$ .

1) если  $\langle E_k \rangle \gg E_{n \min}$ , то вещество находится в газообразном состоянии;

2) если  $\langle E_k \rangle \ll E_{n \min}$ , то вещество находится в твердом состоянии;

3) если  $\langle E_k \rangle = E_{n \min}$ , то вещество находится в жидком состоянии.

Теперь подробно остановимся на свойствах агрегатного состояния и на процессе перехода вещества из одного агрегатного состояния в другое.



### § 48. Реальный газ. Уравнение состояния реального газа

**Содержание:** реальный газ; собственный объем молекулы; взаимодействие молекул; уравнение состояния реального газа.

**Реальный газ.** В разделе молекулярной физики мы широко пользовались моделью идеального газа, так как эта модель позволяет описывать поведение разреженных реальных газов при достаточно высоких температурах и низких давлениях. Но повышение давления приводит к уменьшению среднего расстояния между молекулами, поэтому необходимо учитывать собственный объем молекул и взаимодействие между ними, т.е. приходится иметь дело с реальным газом, существующим в природе.

**Собственные объемы молекул.** В  $1 \text{ м}^3$  газа при нормальных условиях содержится  $2,68 \cdot 10^{25}$  молекул, занимающих объем примерно  $10^{-4} \text{ м}^3$  (радиус молекулы примерно  $10^{-10} \text{ м}$ .) Конечно, одной десятичной частью объема от  $1 \text{ м}^3$  можно пренебречь. Но при давлении 500 МПа собственный объем молекул составит уже половину всего объема газа. В этом случае абсолютно нельзя не учитывать собственный объем молекул. Поэтому в уравнение Клапейрона—Менделеева, написанное для идеального газа (для 1 моля газа), надо ввести поправку, учитывающую собственный объем молекул:

$$pV_m = RT.$$

Если собственный объем молекулы обозначить буквой  $b$ , то свободный объем, где молекулы могут двигаться, будет равен

$$V_m = b, \quad (48.1)$$

где  $V_m$  — объем одного моля газа.

**Взаимодействие молекул.** Действие сил притяжения между молекулами реального газа приводит к возникновению дополнительного давления. Это давление называется внутренним давлением. По вычислениям, проведенным голландским физиком И. Ван-дер-Ваальсом, это давление обратно пропорционально квадрату молярного объема:

$$p' = \frac{a}{V_m^2}, \quad (48.2)$$

где  $a$  — постоянная И. Ван-дер-Ваальса, характеризующая силу притяжения между молекулами. Значит, в реальных газах давление будет

$$\left( p + \frac{a}{V_m^2} \right), \quad (48.3)$$

где  $p$  — давление идеального газа.

**Уравнение состояния идеального газа.** Теперь, учитывая (48.1) и (48.3) (т.е. в уравнение Клапейрона—Менделеева вместо давления и объема подставим найденные значения), напишем уравнение состояния:

$$\left( p + \frac{a}{V_m^2} \right) \cdot (V_m - b) = RT. \quad (48.4)$$

Это уравнение называется уравнением Ван-дер-Ваальса для одного моля газа, или уравнением состояния реального газа.

Поправки  $a$  и  $b$  — постоянные для каждого газа величины, определяемые опытным путем.

Чтобы написать уравнение (48.4) для любого количества газов  $\nu$  учитываем, что  $V = \nu V_m$  и  $V_m = V/\nu$

$$\left( p + \frac{\nu^2 a}{V^2} \right) \left( \frac{V}{\nu} - b \right) = RT \quad (48.5)$$

или

$$\left( p + \frac{\nu^2 a}{V^2} \right) (V - \nu b) = \nu RT. \quad (48.6)$$



### Вопросы для самопроверки

1. Как определяются агрегатные состояния веществ? 2. Какое состояние выражается как  $\langle E_k \rangle \gg E_{n \min}$ ? 3. Какое состояние выражается как  $\langle E_k \rangle \ll E_{n \min}$ ? 4. Какое состояние выражается как  $\langle E_k \rangle \approx E_{n \min}$ ? 5. Какой газ называют реальным и чем он отличается от идеального? 6. Обязательно ли при нормальных условиях принимать в расчет собственный объем молекул? 7. Когда надо принимать в расчет собственный объем молекул? 8. Чему равен собствен-

ный объем молекул при их движении? 9. Какие силы в реальных газах приводят к появлению внутреннего давления? 10. Чему равно внутреннее давление? 11. Чему равно полное давление реального газа? 12. Каково уравнение состояния для одного моля газа. 13. Каково уравнение состояния для любого количества газа? 14. Как определяются значения постоянных Ван-дер-Ваальса?



**Содержание:** испарение; конденсация; насыщенный пар; изотермы Ван-дер-Ваальса; критическое состояние: перегретый пар и его использование в технике.

**Испарение:** Переход вещества в состояние пара (газа) называется испарением. Испаряются не только жидкости, но и твердые тела. Испарение твердых тел называется *сублимацией*, или *возгонкой*.

Рассмотрим процесс испарения жидкости. *Испарение* — это результат беспорядочного движения молекул жидкости. Чтобы покинуть поверхность жидкости, каждая молекула должна преодолеть сопротивление поверхностного слоя, возникающего вследствие притяжения молекул. Т. е. кинетическая энергия должна быть достаточной, чтобы преодолеть поверхностный слой. При удалении молекулы жидкости от поверхностного слоя на расстояние, превышающее радиус действия сил притяжения между молекулами, молекула превращается в пар. Скорость молекул жидкости различная. Только те из них, которые обладают самой большой энергией (имеющие наибольшую кинетическую энергию), могут покинуть поверхность жидкости. В результате в жидкости остаются молекулы с маленькими скоростями, и температура жидкости понижается. Для сохранения температуры жидкости постоянной или для ускорения процесса испарения жидкости передается дополнительное количество теплоты. Если нагревать жидкость, то увеличивается число молекул, имеющих большую скорость, в результате увеличивается число молекул, покидающих поверхность жидкости. От природы жидкости зависит сила притяжения между молекулами, значит, и работа выхода, т. е. работа, совершаемая молекулой, чтобы покинуть поверхность жидкости или количество теплоты, необходимое для полного испарения одинакового количества жидкости, будет различной. Чтобы характеризовать это свойство жидкости, вводится понятие удельной теплоты парообразования.

**Удельной теплотой парообразования** называют количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг жидкости в пар при постоянной температуре, которая обозначается  $r$ :

$$r = \frac{Q}{m}, \quad (49.1)$$

где  $Q$  — количество теплоты,  $m$  — масса жидкости.

Единица удельной теплоты парообразования в СИ — Дж/кг.

$$[r] = \frac{[Q]}{[m]} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

**Конденсация.** Переход пара в жидкое или твердое состояние в результате охлаждения или сжатия называют *конденсацией*.

Какое количество теплоты тратится на испарение жидкости, такое же количество теплоты выделяется при конденсации. Значит, при испарении возрастает внутренняя энергия вещества (отбирается количество теплоты), при конденсации внутренняя энергия уменьшается (выделяется теплота). Оба эти процесса — результат обмена энергией между веществом и окружающей средой.

Конденсация может происходить двумя способами. Молекула пара, совершающая беспорядочное движение, может вновь попасть в поле действия молекул жидкости. Такие молекулы захватываются жидкостью.

В результате охлаждения энергия молекул пара уменьшается, молекулы соединяются, образуя капли, и возвращаются в жидкость. Дождь, снег, роса и иней — результат конденсации пара в природе.

**Насыщенный пар.** Пусть жидкость находится в сосуде, откуда откачали воздух. Сначала число молекул, покидающих жидкость, возрастает. С увеличением числа молекул пара возрастает и число молекул, возвращающихся в жидкость. В определенное время число испаряющихся и возвращающихся молекул уравнивается. Это состояние называется *состоянием динамического равновесия между паром и жидкостью*. Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называется *насыщенным*. С увеличением числа молекул пара над жидкостью при постоянной температуре растет и давление пара. При насыщении пара давление тоже достигнет своего наивысшего значения.

Теперь изучим зависимость давления насыщенного пара при постоянной температуре от объема. Так как данный процесс изотермический ( $T = \text{const}$ ), обратимся к изотермам реального газа, или Ван-дер-Ваальса.

**Изотермы Ван-дер-Ваальса.** На рисунке 71 приводятся изотермы Ван-дер-Ваальса для одного моля газа. На одной изотерме имеется только одна точка перегиба ( $\kappa$ ). Эта изотерма называется *критической изотермой*. Точка перегиба на критической изотерме называют

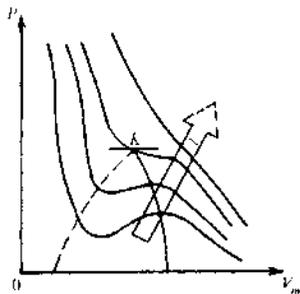


Рис. 71

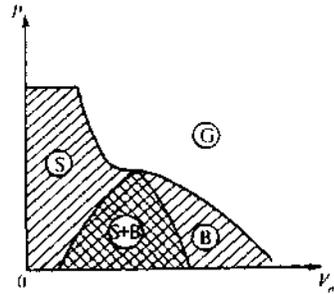


Рис. 72

критической точкой, температуру  $T_k$  — критической температурой, давление  $p_k$  — критическим давлением, объем  $V_k$  — критическим объемом. Состояние с критическими параметрами ( $p_k, V_k, T_k$ ) называют критическим состоянием. Изотерма, находящаяся выше критической изотермы ( $T > T_k$ ), похожа на изотерму идеального газа. Изотермы, находящиеся ниже критической изотермы ( $T < T_k$ ), имеют волнообразную форму. Если через крайние точки горизонтальных участков семейства Ван-дер-Ваальсовых изотерм провести линию, то получится колоколообразная кривая (рис. 72). Эта кривая и критическая изотерма делят диаграмму  $p, V_m$  на три области. Под колоколообразной кривой располагается область двухфазных состояний: жидкости и насыщенного пара. В левой части находится область жидкого состояния, а справа — область пара.

Пар отличается от остальных газообразных состояний тем, что при изотермическом сжатии претерпевает процесс сжижения.

Если температура газа выше критической температуры, то этот газ нельзя обратить в жидкость ни при каких давлениях.

Значит, критическая температура — это самая высокая температура, при которой газ можно обратить в жидкость.

**Критическое состояние.** Возникает вопрос: как ведет себя вещество в критическом состоянии? По мере увеличения температуры увеличивается плотность насыщенного пара, плотность жидкости из-за расширения уменьшается. С повышением температуры значения этих плотностей приближаются друг к другу и при определенной температуре становятся равными. Другими словами, исчезает разница между жидкостью и паром. Такое состояние жидкости называется *критическим состоянием*, а температура — *критической температурой*. Как было сказано выше, критическое состояние характеризуется критическими параметрами  $p_k, V_k, T_k$ . Каждое вещество характеризуется своей критической температурой. Например, для гелия  $T_k = 5$  К, для воды  $T_k = 647$  К.

**Перегретый пар и его использование в технике.** Перегретым называется пар, имеющий при постоянном давлении температуру, выше своей температуры насыщения. Перегретый пар используется как рабочее тело в тепловых двигателях, турбинах. Известно, что один из методов эффективного использования внутренней энергии горючего — это превращение его в энергию пара. При расширении пар совершает работу и охлаждается. Его внутренняя энергия превращается в механическую энергию поршня или вращающейся турбины. Перегретый пар (сухой) из котла направляется в турбину. Температура перегретого пара столь высока, что КПД таких турбин достигает 45%.

После совершения работы в турбине пар по-прежнему имеет высокую температуру и запас энергии и используется в системах отопления.

Энергия водяного пара широко используется в паровых турбинах тепловых электростанций, в тепловых машинах и в пищевой промышленности.



#### Вопросы для самопроверки

1. Что называют испарением?
2. Как называют испарение твердого тела?
3. Когда молекула может покинуть жидкость?
4. Когда молекула жидкости превращается в молекулу пара?
5. Изменяется ли температура жидкости в результате испарения?
6. В чем причина изменения температуры жидкости при испарении?
7. Приведите три примера изменения температуры при испарении.
8. Как можно объяснить увеличение скорости испарения при нагревании жидкости?
9. Равна ли для различных жидкостей работа, совершаемая молекулой при покидании поверхности жидкости?
10. С какой целью было введено понятие удельной теплоты парообразования?
11. Что называют удельной теплотой парообразования?
12. Что называют конденсацией?
13. Поглощается или выделяется энергия при конденсации?
14. Повышается или понижается при конденсации внутренняя энергия системы?
15. Каковы причины возникновения конденсации?
16. Как образуются дождь, снег, роса и иней?
17. Какой пар называют насыщенным?
18. Каково давление насыщенного пара?
19. Чем отличаются изотермы Ван-дер-Ваальса от изотерм идеального газа?
20. Какая изотерма называется критической?
21. Как называется точка перегиба и ее параметры?
22. На сколько и на какие области делится диаграмма  $p, V_m$  — колоколообразная линия?
23. При какой температуре газ превращается в жидкость?
24. Какое состояние называется критическим?
25. Одинаковы ли значения критических параметров для различных жидкостей?
26. Какой пар называется перегретым?
27. Чему равен КПД паровых турбин?
28. Используется ли отработанный после турбины пар?

## § 50. Сжижение газов

**Содержание:** сжижение газов; использование в технике сжиженных газов.

**Сжижение газов.** *Сжижением газа* называют переход газа в жидкое состояние. Такие газы, как хлор, углекислый газ, аммиак легко были получены в жидком виде, но для сжижения таких газов, как кислород, азот, водород, гелий, все старания долгое время терпели неудачу. Даже появилось мнение, что кислород и азот вообще не могут находиться в жидком состоянии.

Но причину неудачи этих попыток первым объяснил Д.И. Менделеев. Газ можно перевести в жидкое состояние, если температура будет ниже критической температуры, а давление выше критического давления. Другими словами, чтобы перевести газ в жидкое состояние, нужно его температуру понизить до критической температуры. Чтобы перевести газы в жидкое состояние, понижение их температуры осуществляется двумя методами: 1) если температура газа ниже температуры инверсии и критической, тогда температура газа понижается за счет совершения работы против сил притяжения молекул при расширении газа; 2) температура газа понижается в результате совершения работы против внешних сил при адиабатическом расширении.

Чтобы перевести в жидкое состояние газ с высокой критической температурой, газ сначала нагревают, а затем охлаждают. Таким образом получают жидкий хлор ( $T_k = 415,15 \text{ K}$ ), аммиак ( $T_k = 405,55 \text{ K}$ ).

Чтобы получить жидкий кислород ( $T_k = 154,45 \text{ K}$ ), азот ( $T_k = 126,05 \text{ K}$ ), водород ( $T_k = 33,25 \text{ K}$ ) и гелий ( $T_k = 5,25 \text{ K}$ ), используется устройство, которое называется *детандером*. В детандере для перевода газа в жидкое состояние используют оба метода, приведенные выше. Самый совершенный турбодетандер реактивного типа был разработан академиком П.Л. Капицей. В этой установке сжатый газ вращает турбину и одновременно расширяется, т.е. совершает работу против внешних сил и против сил межмолекулярного притяжения. При этом газ сильно охлаждается и конденсирует.

**Применение сжиженного газа в технике.** Получение жидкого воздуха имеет огромное значение для развития техники. Большое содержание в его составе кислорода сильно помогает процессу горения. Жидкий воздух, впитавший угольную пыль, взрывается не хуже динамита. Жидкий воздух используется для обогащения горючей смеси самолетов, летающих в стратосфере, для ускорения процессов в доменных печах и т. д.

При температуре жидкого воздуха различные вещества могут переходить в твердое состояние. Например, если ртуть опустить в жидкий воздух, то можно получить твердую ртуть.

При температуре сжижения газов свойства многих веществ резко меняются. Например, ртутным и цинковым молотком можно забивать гвозди, а пластичный металл — свинец становится упругим, как сталь.

Жидкие газы очень легко испаряются. Для их хранения Дьюар изготовил специальный сосуд. Он состоит из двух вставленных друг в друга стеклянных сосудов, воздух между ними откачивается, теплообмен между веществом, находящимся в сосуде, и внешней средой делается по возможности маленьким. Чтобы падающие лучи не нагревали сосуд, его стенки делают зеркальными.

Сосуд Дьюара очень похож на термос, сохраняющий наши продукты горячими.



### Вопросы для самопроверки

1. Что называют сжижением газа? 2. Когда можно сжижать газ?
3. Какие методы существуют для понижения температуры газа? 4. Как охлаждается газ с высокой критической температурой? 5. С какой целью используется детандер? 6. Кто изобрел реактивный турбодетандер? 7. В чем суть принципа работы реактивного турбодетандера? 8. Где используется жидкий воздух? 9. Как получают твердую ртуть и твердый спирт? 10. Как меняются свойства веществ при температуре сжижения газов? 11. С какой целью используется сосуд Дьюара? 12. Как устроен сосуд Дьюара?



## § 51. Влажность воздуха. Точка росы

**Содержание:** влажность: абсолютная и относительная влажность; точка росы; гигрометр; психрометр.

**Влажность.** С поверхности всех водоемов на Земле происходит непрерывное испарение воды. Поэтому в атмосфере Земли присутствуют и пары воды. Для оценки количества водяного пара в атмосфере вводится понятие влажности.

**Абсолютная и относительная влажность.** *Абсолютной влажностью* называется величина, характеризующая количество водяных паров в  $1 \text{ м}^3$  воздуха.

На практике наряду с абсолютной влажностью имеет важное значение знать степень насыщения воздуха паром. С этой целью вводится понятие относительной влажности. *Относительной влажностью* называют отношение абсолютной влажности  $D$  к количеству водяных паров  $D_0$ , необходимое для насыщения  $1 \text{ м}^3$  воздуха при той же температуре, выраженное в процентах:

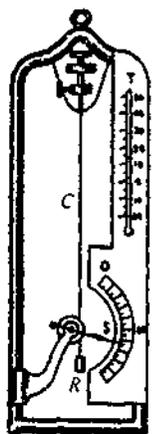


Рис. 73

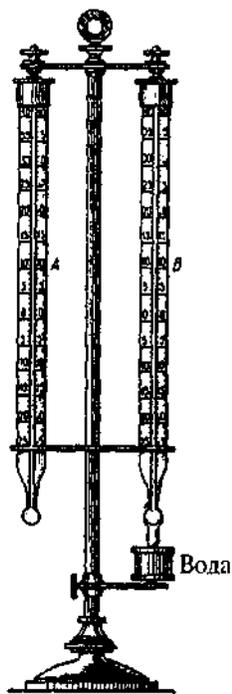


Рис. 74

$$f = \frac{D}{D_0} \cdot 100\%.$$

Если в воздухе не содержатся водяные пары, то абсолютная и относительная влажности будут равны нулю.

**Точка росы.** Температура, при которой водяной пар становится насыщенным, называют *точкой росы*.

Значение  $D_0$  для разных температур дается в таблице. Таким образом, если известна точка росы и температура воздуха, то по таблице можно найти соответствующее значение  $D$  и  $D_0$  и вычислить относительную влажность  $f$ .

**Гигрометр.** Прибор, используемый для определения влажности воздуха, называют *гигрометром*. Принцип работы самого простого гигрометра основан на удлинении человеческого волоса при повышении влажности. Устройство волосяного гигрометра показано на рисунке 73. Верхний конец волоса  $C$  закрепляется, на второй конец, пропущенный через легкий блок, подвешен груз  $R$ , прикрепленная к блоку стрелка  $S$  показывает изменение длины волоса. Заранее проградуировав прибор, можно непосредственно определить относительную влажность.

**Психрометр.** Для более точного определения влажности воздуха используется прибор психрометр (рис. 74). Он состоит из двух термометров: ртутный шарик одного термометра окружен полоской ткани, конец которой опущен в воду. Вода поднимается по капиллярам ткани и смачивает ртутный шарик. Если воздух не насыщен водяными парами, вода испаряется и термометр охлаждается. В результате показания термометра, окруженного влажной тканью, будут меньше, чем сухого термометра.

Чем воздух будет суше, тем больше будет разность между показаниями термометров. По разности температур обоих термометров с помощью психрометрической таблицы можно определить влажность воздуха. Если воздух будет насыщен парами воды, то вода в ткани не испаряется. Показания обоих тер-

мометров будут одинаковы, и влажность воздуха будет 100%. Такое состояние может быть, когда идет дождь и при тумане.



### Вопросы для самопроверки

1. С какой целью введено понятие влажности? 2. Что называют абсолютной влажностью? 3. Что называют относительной влажностью? 4. Какая температура называется точкой росы? 5. С какой целью используется гигрометр? 6. Каково устройство волосяного гигрометра? 7. На чем основан принцип работы волосяного гигрометра? 8. С какой целью используется психрометр? 9. Как устроен психрометр? 10. На чем основан принцип работы психрометра? 11. Когда показание мокрого термометра будет ниже показания сухого? 12. Когда разница между показаниями термометров будет наибольшей? 13. Что показывает психрометрическая таблица? 14. Какой будет относительная влажность воздуха, если показания обоих термометров будут одинаковыми? 15. Чему будет равна относительная влажность при тумане?



## § 52. Атмосфера и гидросфера. Атмосфера

### планет

**Содержание:** атмосфера; тропосфера; стратосфера, мезосфера; термосфера; экзосфера; атмосфера Венеры; атмосферы других планет; гидросфера; значение Мирового океана для жизни.

**Атмосфера.** Воздушная оболочка Земли называется атмосферой (греч. *atmos* — пар, *sfera* — шар). Она вращается с Землей как единое целое. Ее масса около  $5,15 \cdot 10^6$  кг. Атмосферу Земли составляют азот 78,1%, кислород 21%, аргон 0,9%. В очень небольших количествах присутствуют углекислый газ, водород, гелий, неон и другие газы. На высоте 20—25 км располагается азоновый слой, предохраняющий живые организмы от губительного воздействия коротковолновых лучей.

В нижних слоях атмосферы присутствуют и пары воды. На высоте выше 100 км состав атмосферы меняется. Верхний слой атмосферы в основном составляют водород и гелий. По мере подъема на высоту плотность и давление уменьшаются. Наличие атмосферы играет важную роль в тепловом балансе. Содержащиеся в атмосфере пары воды и углекислый газ поглощают тепловые лучи и предохраняют Землю от охлаждения. Другими словами, атмосфера создает парниковый эффект, понижает суточные и сезонные колебания температуры. Если бы не было атмосферы, то солнечная сторона Земли разогревалась бы до очень высокой температуры, а обратная сторона замерзла бы и на Земле не было бы жизни.

Атмосфера делится на тропосферу, стратосферу, мезосферу, термосферу и экзосферу (рис. 75).

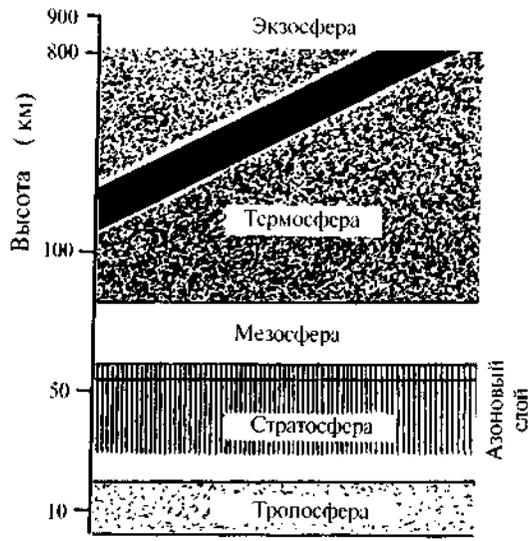


Рис. 75.

**Тропосфера.** Основную массу атмосферы составляет воздушный слой вокруг Земли, называемый *тропосферой*. Его высота на полярной широте составляет 10 км, на экваториальной широте — 17 км.

Все явления, которые приводят к изменению погоды на Земле, происходят в тропосфере. Здесь важное место занимает испарение и конденсация пара. С поверхности различных водоемов за сутки испаряется

$7 \cdot 10^{12}$  м<sup>3</sup> воды, столько же воды возвращается в виде осадков. Поэтому среднее количество паров воды в атмосфере остается постоянной.

Водяные пары, образовавшиеся на поверхности Земли, увлекаются тепловым движением воздушного слоя. Облака, поднявшиеся на высоту 1,5—2 км, приходят в насыщенное состояние и конденсируются. Из взвешенных капель в поднимающемся воздухе образуются облака. Размеры капель облаков бывают порядка 0,01 мм. В результате уплотнения облаков размеры капель увеличиваются до 1—5 мм. Такие капли облака не могут удерживать и в результате лотом идет дождь, а зимой снег. В результате конденсации пара и образования облаков происходит выделение количества теплоты. Поэтому эти процессы оказывают определенное влияние на энергетическое состояние нижних слоев тропосферы. Но тропосфера в основном получает тепло с поверхности Земли. По мере подъема вверх, на каждые 100 м, температура тропосферы понижается на 1 К. В верхних слоях тропосферы понижение температуры замедляется и на высоте около 2 км температура остается почти постоянной.

**Стратосфера.** Выше тропосферы располагается стратосфера. В стратосфере температура повышается. Если она на нижней границе стратосферы она составляет 200—210 К, то на верхней границе бывает около 280 К. Высота стратосферы достигает до 50—55 км, среднее значение давления составляет 1000 Па.

**Мезосфера.** Выше стратосферы расположена мезосфера. Она простирается до 80 км. Температура в ней по мере подъема уменьшается и на верхней границе составляет около 160 К.

**Термосфера.** В следующем слое атмосферы — термосфере температура еще больше возрастает. На высоте 600 км температура равна 1700 К, ночью — 1200 К. Искусственные спутники Земли и космические корабли летают именно на этой высоте. В термосфере давление очень низкое — около 10 Па, т. к. концентрация газа очень низкая, высокая температура не может сильно разогреть поверхность спутников и космических кораблей.

**Экзосфера.** Начиная с высоты 800 км начинается верхний слой атмосферы — экзосфера. Экзосфера примыкает к межпланетной пустоте.

**Атмосфера Венеры.** Атмосфера Венеры резко отличается от атмосферы Земли. 97% ее составляет углекислый газ, 2% — азот и 1% — кислород. Такой состав атмосферы и большая плотность (давление на поверхности доходит до 100 атм.) усиливает парниковый эффект. Хотя основную часть атмосферы Венеры составляет углекислый газ, общее количество углекислого газа на Венере и на Земле почти одинаковое. Если на Земле углекислый газ находится в составе различных горных пород, то на Венере он входит в состав атмосферы.

Развитие на Земле растительности способствовало большому содержанию кислорода в ее атмосфере.

**Атмосферы других планет.** В составе атмосферы Марса были обнаружены углекислый газ, пары воды. Давление там не превышает 100 Па. В атмосфере Меркурия тоже имеется углекислый газ. Но если учесть, что температура на поверхности Меркурия доходит до 620 К, это говорит об отсутствии атмосферы.

Основную часть атмосферы гигантских планет (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) составляют водород, аммиак, метан, гелий. Причиной этому стал тот факт, что при образовании Солнечной системы из газопылевого облака, водород и гелий были вытеснены на периферию, а тяжелые элементы остались ближе к Солнцу.

**Гидросфера.** Водная оболочка Земли называется гидросферой и в отличие от атмосферы покрывает не всю поверхность Земли, а только 70,8%. В водную оболочку Земли входят не только воды океанов и морей, но и воды рек, озер, подземные воды, родники. Материки и острова разделяют гидросферу на океаны, моря, заливы и проливы.

Самое большое скопление воды на поверхности Земли — это океаны, они составляют 94% всей гидросферы. Объем Мирового океана равен  $1,37 \cdot 10^{18}$  м<sup>3</sup>, с его поверхности каждый год испаряется  $4,5 \cdot 10^{14}$  м<sup>3</sup> воды и почти столько же воды реки возвращают в Океан. Для полного испарения океанских вод потребуется 3000 лет, т. е. через 3000 лет воды Океана полностью обновляются. Точно так же и воды рек обновляются каждые 10—12 суток. Вся водная масса Земли находится в постоянном движении и круговороте. Если вода, испаряясь с поверхности

Океана и суши, пополняет запасы влаги в атмосфере, в свою очередь дождь, снег возвращают воду в Океан и на сушу.

**Значение Мирового океана.** Растительность, появившаяся в Океане, обогатила атмосферу кислородом и создала условия для жизни разных животных. Растительный мир в Океане, разделяющий воду на водород и кислород, до сих пор является источником свободного кислорода в атмосфере. Между Океаном, атмосферой и суши непрерывно происходит обмен веществ. Влага, испаряясь с поверхности Океана, с ветром уносится на материк и в виде дождя орошает Землю. В составе естественных вод в растворенном виде содержатся различные газы, в основном, азот, кислород и углекислый газ. Углекислый газ, который переходит из атмосферы в воду, используется растениями для фотосинтеза. Мир живых организмов, состоящий из животных и растений, за год из углекислого газа выделяют 100 млрд тонн углерода. В Океане углекислого газа в 60 раз больше, чем в атмосфере.

Известно, что теплоемкость воды довольно большая, количество теплоты, выделяющееся при охлаждении  $1 \text{ м}^3$  воды, может нагреть воздух объемом  $3300 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ К}$ . Поэтому океаны и моря аккумулируют солнечное тепло и равномерно распределяют это тепло по поверхности планеты.



#### Вопросы для самопроверки

1. Что такое атмосфера? 2. Чему равна масса атмосферы? 3. Находится ли она в движении или покоится? 3. Каков состав атмосферы? 4. На какой высоте находится азоновый слой и какую роль он выполняет? 5. Какова роль атмосферы в тепловом балансе? 6. На какие слои делится атмосфера? 7. Что вы знаете о тропосфере? 8. Сколько воды испаряется с поверхности водоемов за 1 сутки? 9. На какой высоте происходит конденсация водяных паров? 10. Как образуются облака? 11. Как меняется температура с высотой? 12. Где располагается стратосфера и как меняется температура в ней? 13. Какой высоты достигает стратосфера? 14. Где располагается мезосфера? Какова ее высота и изменение температуры в ней? 15. В чем причина выбора термосферы для полетов искусственных спутников и космических кораблей? 16. Как меняется температура в термосфере? 17. С какой высоты начинается экзосфера? 18. Чем отличается атмосфера Венеры от атмосферы Земли? 19. В чем причина, что в атмосфере Земли много кислорода? 20. Что вы знаете об атмосферах других планет? 21. Что называют гидросферой? Какую часть земной поверхности она покрывает? 22. Чему равен объем Мирового океана и сколько воды испаряется из него за 1 год? 23. Что является основой источника

свободного кислорода в атмосфере? 24. Каково значение океанов и морей на Земле для сохранения теплового баланса?



### § 53. Кипение. Образование пара и уравнение теплового баланса при конденсации

**Содержание:** кипение; зависимость температуры кипения от давления; удельная теплота парообразования; уравнение теплового баланса при конденсации.

**Кипение.** Кипением называется процесс парообразования в результате интенсивного образования пузырьков пара не только на свободной поверхности, но и по всему объему жидкости. Значит, кипение — это частный случай превращения жидкости в пар.

Будем нагревать жидкость в открытом сосуде. В любой жидкости всегда присутствуют растворенные газы. По мере увеличения температуры из жидкости выделяется газ и прилипает к внутренним стенкам сосуда в виде маленьких пузырьков. С увеличением температуры размеры пузырьков увеличиваются и они всплывают на поверхность жидкости.

В верхних слоях жидкости, где температура ниже, объем пузырьков уменьшается за счет конденсации паров воды внутри пузырьков (рис. 76 а).

Когда температура жидкости везде станет одинаковой, объем пузырьков по мере всплытия увеличивается. Причиной этому является то, что давление насыщенного пара внутри пузырьков  $r_n = nkT$  остается без изменения, а гидростатическое давление  $r_r = rgh$  уменьшается.

Объем увеличивающихся в размерах пузырьков будет полностью заполнен насыщенным паром, т.е. при постоянной температуре давление насыщенного пара не зависит от объема.

Когда пузырек достигнет поверхности жидкости, давление насыщенного пара на практике будет равно атмосферному давлению на поверхности жидкости.

Насыщенный пар, заполнивший пузырек, выйдет в атмосферу (рис. 76 б). Происходит кипение.

Когда давление насыщенного пара сравняется с внешним давлением, процесс кипения будет происходить по всему объему жидкости при одинаковой температуре.

**В нормальных условиях кипение начинается при определенной температуре, при которой давление насы-**

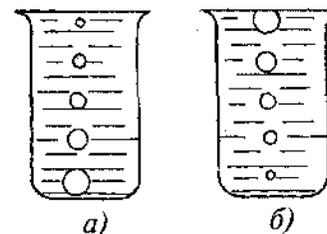


Рис. 76

щенного пара любой жидкости сравнивается с давлением в жидкости.

Эта температура называется температурой кипения.

**Зависимость температуры кипения от давления.** Если на поверхности жидкости давление будет ниже, тогда давление насыщенного пара в момент кипения тоже будет ниже. Значит, будет ниже и температура кипения. Таким образом, приходим к мнению, что температура кипения зависит от внешнего давления. Чем ниже будет внешнее давление, тем ниже будет и температура кипения. Явным доказательством нашего заключения является тот факт, что на вершинах гор, где атмосферное давление ниже, вода закипает при более низких температурах, чем на уровне моря. В котлах паровых машин, где давление атмосферы намного больше 15 атм. ( $15 \cdot 10^5$  Па), температура кипения воды равна  $200^\circ\text{C}$  (473 К).

**Удельная теплота парообразования.** Количество теплоты, передаваемое жидкости в процессе кипения, в основном тратится на:

1. Совершение работы против внешнего давления для образования пузырьков пара и их движения;

2. Восполнение потери тепла в результате испарения жидкости.

Какое количество теплоты расходуется для превращения в пар одинакового количества различных жидкостей, находящихся при одной и той же температуре? А равное количество одинаковых жидкостей, имеющих разную температуру?

Естественно, в обоих случаях раходуется разное количество теплоты.

Количество теплоты, необходимое для превращения при температуре кипения 1 кг жидкости в пар, называют *удельной теплотой парообразования*.

Количество теплоты  $Q$ , необходимое для превращения жидкости массой  $m$  в пар, определяется следующим образом:

$$Q = rm, \quad (53.1)$$

отсюда

$$r = \frac{Q}{m}. \quad (53.2)$$

Выражение (53.2) дает возможность найти единицу измерения удельной теплоты парообразования в СИ:

$$[r] = \frac{[Q]}{[m]} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

Согласно закону сохранения энергии при конденсации пара массой  $m$  выделяется количество теплоты, равное (53.1).

Удельная теплота парообразования зависит от температуры: с понижением температуры она повышается. Причиной этому является то, что энергия молекул у жидкости с низкой температурой маленькая; чтобы они могли покинуть поверхность жидкости, им потребуется большое количество теплоты.



### Вопросы для самопроверки

1. Что называют кипением? 2. Почему у пузырьков пара по мере всплытия вверх размеры уменьшаются? 3. Когда по мере всплытия вверх их размеры увеличиваются? 4. В чем причина увеличения размеров при всплытии? 5. Что находится внутри увеличивающегося пузырька? 6. Какие условия должны выполняться, чтобы процесс кипения происходил по всему объему жидкости при одной температуре? 7. Когда закипает жидкость? 8. Какая температура называется температурой кипения? 9. Зависит ли температура кипения от внешнего давления? 10. Почему при низком внешнем давлении температура кипения тоже будет низкой? 11. Почему на вершинах гор температура кипения бывает низкой? 12. Почему в паровых котлах температура кипения бывает высокой? 13. На что тратится подводимое к жидкости тепло в процессе кипения? 14. Для чего вводится понятие удельной теплоты парообразования? 15. Что называют удельной теплотой парообразования? 16. Какова единица удельной теплоты парообразования в СИ? 17. Будет ли равно количество теплоты, истраченной на испарение жидкости, количеству теплоты, выделившейся при конденсации? 18. Зависит ли от температуры удельная теплота парообразования? 19. Как можно объяснить зависимость удельной теплоты парообразования от температуры?



### § 54. Свойство жидкости. Поверхностное натяжение. Энергия поверхностного слоя

**Содержание:** жидкое состояние вещества; строение жидкости; молекулярное давление; поверхностное натяжение; энергия поверхностного слоя.

**Жидкое состояние вещества:** Жидкость — это промежуточное агрегатное состояние между газом и твердым телом. Поэтому некоторые ее свойства похожи на свойства газа, а некоторые — на свойства твердого тела. Подобно твердому телу жидкость обладает определенным объемом, а подобно газу принимает форму сосуда, в котором она находится. Практически молекулы газа не связаны между собой, а молекулы жидкости очень сильно связаны между собой и располагаются на определенном расстоянии друг от друга.

В твердых и жидких телах энергия беспорядочного-теплового движения намного меньше потенциальной энергии межмолекулярного взаимодействия и не может преодолеть ее. Поэтому жидкости и твердые тела имеют определенный объем. Из-за того, что силы взаимодействия между молекулами жидкости больше, они практически не сжимаются. Другими словами, жидкость с очень большой межмолекулярной силой взаимодействия не чувствует внешнее давление. Поэтому межмолекулярная сила взаимодействия называется *молекулярным давлением*. Расчеты показывают, что молекулярное давление воды равно приблизительно 1100 МПа. Вместе с этим, молекулы жидкости обладают свойством обмениваться местами, т.е. жидкость может течь и принимать форму сосуда, в котором она находится. Если жидкость находится в равновесии, то ее молекулы совершают колебательное движение около определенного положения равновесия. В этом случае силы притяжения и отталкивания будут равны.

**Строение жидкости.** Рентгеноструктурный анализ жидкостей показал, что в молекулярном строении жидкостей есть много общего с молекулярным строением твердых тел. Если для твердых тел характерен дальний порядок в расположении частиц, для жидкостей наблюдается ближний порядок в расположении частиц, сравнимых с межатомными.

Посвятивший свои исследования изучению свойств жидкостей Я. Френкель (1884—1952) создал следующую теорию. По теории Френкеля, молекула жидкости в течение некоторого времени колеблется около определенного положения равновесия, будто стоит в узле кристаллической решетки, а затем скачком переходит на новое положение, на новый узел, отстоящий от исходного на расстоянии порядка межатомного. Пребывание молекулы в таком положении ничтожно мало и составляет  $10^{-10}$ — $10^{-12}$  с.

Значит, упрощенно можно рассматривать переход молекулы из одного положения в другое как переход из одного узла решетки в другой, а расстояние перехода — как постоянную решетки. Молекула, находящаяся в узле решетки, совершает колебательное движение с амплитудой немного меньше постоянной решетки. Основываясь на этом, можно считать, что жидкость имеет квазикристаллическое (как бы кристаллическое) строение.

**Молекулярное давление.** На каждую молекулу со стороны окружающих молекул действуют силы притяжения (рис. 77). Эти силы быстро убывают с расстоянием и через определенное расстояние ими можно пренебречь. Это расстояние называется *радиусом молекулярного действия* ( $r$ ). Оно бывает в пределах  $10^{-9}$  м. Сферу радиуса  $r$  называют *сферой молекулярного действия*.

Выделим внутри жидкости какую-либо молекулу (рис. 77) и проведем вокруг нее сферу молекулярного действия радиуса  $r$ . На молекулу  $A$  можно учитывать действие силы только тех молекул, которые находятся внутри сферы молекулярного действия. Силы действий этих молекул на молекулу  $A$  направлены в разные стороны и компенсируют друг друга.

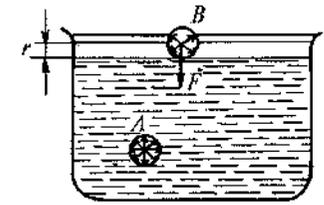


Рис. 77

Таким образом, результирующая сила, действующая на молекулу внутри жидкости со стороны других молекул, равна нулю. Если молекула  $B$  расположена от поверхности жидкости на расстоянии, меньшем  $r$ , то результирующая сила не равна нулю. Как видно из рисунка 77, на верху молекулы  $B$  нет молекул, из-за этого результирующая сила  $\vec{F}$  будет направлена внутрь жидкости. Таким образом, расположенные на поверхности жидкости молекулы, т.е. результирующая сила всех молекул поверхностного слоя, оказывают на жидкость давление, т.е. сжимают жидкость. Это давление называется молекулярным, или внутренним давлением. Молекулярное давление не действует на тело, помещенное в жидкость, так как оно обусловлено силами, действующими только между молекулами самой жидкости. Внутреннее давление зависит от температуры, с повышением температуры внутреннее давление уменьшается.

**Поверхностное натяжение.** Таким образом, расположенные на поверхностном слое молекулы, т.е. силы, действующие на поверхностный слой, стягивают поверхность жидкости. Поэтому эти силы называются *силами поверхностного натяжения*. Силы поверхностного натяжения заставляют сократить свободную поверхность жидкости. Поверхностное натяжение определяется следующим образом:

$$\alpha = \frac{F}{l}. \quad (54.1)$$

**Поверхностным натяжением называют силу поверхностного натяжения, приходящуюся на единицу длины контура, стягивающего поверхность.**

Единица поверхностного натяжения в СИ —

$$[\alpha] = \frac{[F]}{[l]} = \frac{\text{Н}}{\text{м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

У большинства жидкостей поверхностное натяжение при 300 К лежит в пределах от  $10^{-2}$  до  $10^{-1}$  Н/м. Поверхностное натяжение зависит от температуры. С повышением температуры жидкости увеличивается среднее расстояние между молекулами, сила взаимного притяжения уменьшается и, значит, уменьшается и поверхностное натяжение.

Поверхностное натяжение очень сильно зависит от примесей, имеющихся в жидкости. Вещества, ослабляющие поверхностное натяжение, называют поверхностно-активными веществами. По отношению к воде поверхностно-активным веществом является мыло. Оно сильно уменьшает поверхностное натяжение воды с  $7,5 \cdot 10^{-2}$  Н/м до  $4,5 \cdot 10^{-2}$  Н/м. Спирт, эфир, нефть, также считаются веществами, понижающими поверхностное натяжение воды. Существуют такие вещества, молекулы которых взаимодействуют с молекулой жидкости сильнее, чем сами молекулы жидкости между собой. Такие вещества усиливают поверхностное натяжение жидкости. К таким веществам относятся сахар, соль и др. Например, если посолить мыльный раствор, то на поверхностный слой молекул мыла выталкивается больше, чем в пресной воде. В мыловаренной технике мыло «высаливается» этим способом из раствора.

**Энергия поверхностного слоя.** Суммарная энергия молекул жидкости складывается из тепловой энергии беспорядочного движения и потенциальной энергии взаимодействия между молекулами. Чтобы переместить молекулу из глубины жидкости к поверхностному слою, надо совершить определенную работу. Эта работа совершается молекулой за счет кинетической энергии и идет на увеличение ее потенциальной энергии. Поэтому молекулы поверхностного слоя жидкости обладают большей потенциальной энергией, чем частицы внутри жидкости. *Поверхностной энергией* слоя называется энергия молекул, находящихся в поверхностном слое. Энергия поверхностного слоя определяется работой, совершаемой для создания этого слоя. Естественно, чем больше поверхность жидкости, тем большую работу надо совершить молекулам, чтобы создать энергию поверхностного слоя:

$$\Delta A = \alpha \cdot \Delta S. \quad (54.2)$$

Отсюда

$$\alpha = \frac{\Delta A}{\Delta S}. \quad (54.3)$$

Значит, поверхностное натяжение  $\alpha$  при постоянной температуре определяется отношением работы  $\Delta A$ , совершаемой для создания этого слоя на поверхности жидкости к площади  $\Delta S$  этого поверхностного слоя.

Если учесть, что работа  $\Delta A$ , совершаемая для создания поверхностного слоя, равна энергии поверхностного слоя  $\Delta E$  ( $\Delta A = \Delta E$ ), то (54.3) можно записать следующим образом:

$$\alpha = \frac{\Delta E}{\Delta S}. \quad (54.4)$$

Из (54.4) видно, что поверхностное натяжение определяется как плотность поверхностной энергии.



## Вопросы для самопроверки

1. Какое состояние вещества называют жидким? 2. Какие свойства жидкости схожи со свойствами газов? 3. Какие свойства жидкости схожи со свойствами твердого тела? 4. Обладает ли жидкость способностью сжиматься? 5. Что называют молекулярным давлением жидкости? 6. Как объясняется свойство жидкости течь и принимать форму сосуда? 7. Как перемешаются молекулы жидкости? 8. Какое строение имеет жидкость? 9. Что представляет собой теория Френкеля о свойствах жидкости? 10. Какое расстояние называется сферой молекулярного действия и чему оно равно? 11. Какой будет результирующая сила, действующая на молекулу внутри жидкости? На молекулу, находящуюся на поверхности? 12. Какое действие оказывает на жидкость результирующая сила, действующая на молекулы, находящиеся на поверхности жидкости? 13. Что называют молекулярным, или внутренним, давлением? 14. Оказывает ли молекулярное давление действие на погруженное в жидкость тело? 15. Зависит ли молекулярное давление от температуры? 16. Какие силы называют силами поверхностного натяжения? 17. Как изменяют поверхность жидкости силы поверхностного натяжения? 18. Что называют поверхностным натяжением и какова его единица в СИ? 19. Зависит ли поверхностное натяжение от температуры и как можно это объяснить? 20. Какие вещества называют поверхностно-активными? 21. Каким образом в производстве мыло отделяется от раствора? 22. Чему равна полная энергия молекулы жидкости? 23. Какая потенциальная энергия больше: у молекул, находящихся на поверхности или внутри жидкости? 24. Какая энергия называется поверхностной энергией? 25. Зависит ли поверхностная энергия от площади поверхностного слоя? 26. Чему равно поверхностное натяжение? 27. Зависит ли плотность поверхностной энергии от поверхностного натяжения?



## § 55. Смачивание. Давление под искривленной поверхностью жидкости. Капиллярность

**Содержание:** смачивание; давление под искривленной поверхностью; капиллярность; значение капиллярности.

**Смачивание:** Жидкость может смачивать или не смачивать твердое тело. Если на поверхность чистого железа капнуть ртуть, то она примет вид, как показано на рисунке 78 а. Здесь говорят, что ртуть смачивает железо.

Теперь каплю ртути поместим на стеклянную пластину: капля стремится принять форму шара, как показано на рисунке 78 б. Здесь говорят, что ртуть не смачивает стекло. Смачивание или несмачивание жидкостью твердого тела зависит от характера сил, действующих между молекулами слоя соприкасающихся сред. Если сила притяжения между молекулами твердого тела и жидкости



Рис. 78.

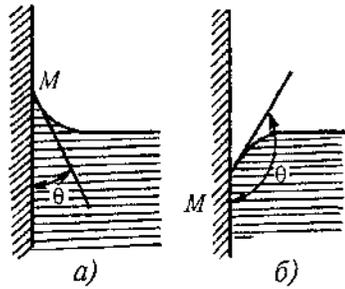


Рис. 79

больше силы притяжения между молекулами самой жидкостью, то жидкость смачивает твердое тело. При этом жидкость старается стремиться увеличить поверхность соприкосновения с твердым телом (ртуть-железо). Если сила притяжения между молекулами твердого тела и жидкости меньше силы притяжения между молекулами самой жидкости, то жидкость не смачивает твердое тело. В

этом случае жидкость стремится уменьшить поверхность своего соприкосновения с твердым телом (ртуть-стекло).

**Давление под искривленной поверхностью жидкости.** Если жидкость налить в тонкую трубочку, около стенки трубочки произойдет прогиб поверхности жидкости. Такой прогиб поверхности называется мениском. Если жидкость смачивает твердое тело, то около стенки трубочки наблюдается поднятие жидкости и мениск будет вогнутым (рис. 79 а). Если жидкость не смачивает твердое тело, то около стенки трубочки наблюдается опускание жидкости и мениск будет выпуклым (рис. 79 б).

Если через точку  $M$ , лежащую на поверхности твердого тела и жидкости провести касательную, то угол  $\theta$  называется краевым углом; для смачивающей жидкости  $\theta < \frac{\pi}{2}$ , для не смачивающей

жидкости  $\theta > \frac{\pi}{2}$ . Мениск хорошо наблюдается в капиллярных трубочках. Если в сосуд с жидкостью опустить капиллярную трубку и жидкость смачивает стенки капилляра, то жидкость поднимается по капилляру на высоту  $h$  (рис. 80 а).

Если жидкость не смачивает стенки капилляра, то жидкость опускается ниже уровня жидкости на высоту  $h$ . Причина этому — искривление поверхности жидкости и возникновение избыточного давления (рис. 80 б). Это давление определяется выражением.

$$\Delta p = \frac{2\alpha}{R}, \quad (55.1)$$

где  $\alpha$  — поверхностное натяжение жидкости,  $R$  — радиус кривизны поверхности.

Если поверхность жидкости вогнутая, то избыточное давление будет отрицательным и жидкость по капилляру поднимается вверх. В широком сосуде над плоской поверхностью жидкости избыточного давления нет (рис. 80 а). Если поверхность жидкости будет выпуклой, избыточное давление будет положительным и приведет к опусканию жидкости в капилляре (рис. 80 б).

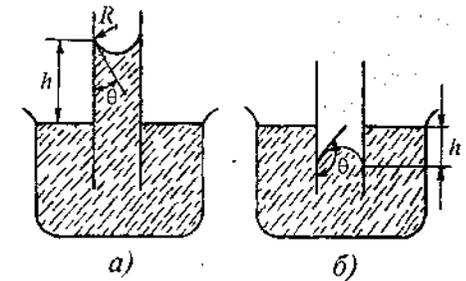


Рис. 80

**Капиллярные явления.** Под капиллярными явлениями понимают изменение высоты уровня жидкости в капиллярах. Жидкость в капиллярах поднимается или опускается на такую высоту  $h$ , пока гидростатическое давление  $r_2 = \rho gh$  столба жидкости не уравновешивается с избыточным давлением  $\Delta r$  (рис. 80 а.), т.е.

$$\frac{2\alpha}{R} = \rho gh, \quad (55.2)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости,  $g$  — ускорение свободного падения. Из (55.2) находим  $h$ :

$$h = \frac{2\alpha}{\rho \cdot g \cdot R}. \quad (55.3)$$

Из выражения (55.3) видно, что высота подъема (опускания) поверхности жидкости в капилляре обратно пропорциональна радиусу капилляра. В тонких капиллярах жидкость поднимается на значительную высоту.

Например, при полном смачивании вода ( $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ,  $\alpha = 0,073 \text{ Н/м}$ ) по капиллярной трубке диаметром 10 мкм поднимается на высоту  $h \approx 3 \text{ м}$ .

**Значение явления капиллярности.** Капиллярные явления играют важную роль в природе и технике. Например, влагообмен в почве и в растениях осуществляется за счет поднятия воды по тончайшим капиллярам. Клетки растений образуют капилляры, и по ним жидкость поднимается вверх. Также капиллярное явление широко используется при осушении болот и в строительстве.



#### Вопросы для самопроверки

1. Какую форму принимает жидкость, если она смачивает твердое тело? 2. А если жидкость не смачивает твердое тело? 3. Когда жидкость смачивает твердое тело? 4. Когда жидкость не смачивает твердое тело?

5. Когда мениск бывает выпуклым, а когда вогнутым? 6. Когда возникает давление под вогнутой поверхностью и чему оно равно? 7. Если поверхность жидкости вогнута, то каким будет избыточное давление? А если поверхность жидкости будет выпуклой? 8. Когда жидкость поднимается по капилляру вверх? 9. Что называют капилляром? 10. Какое явление называется капиллярным? 11. Чему равна высота подъема жидкости в капилляре? 12. Как зависит от радиуса капилляра высота подъема жидкости? 13. Какова роль капилляров при росте растений? 14. Приведите три примера капиллярности.



## § 56. Твердые тела. Моно- и поликристаллы. Полимеры

**Содержание:** анизотропия кристаллов; монокристаллы; поликристаллы; аморфные тела; полимеры; свойства полимеров и их использование.

**Анизотропия кристаллов.** Твердое состояние веществ характеризуется не только наличием значительных сил межмолекулярного взаимодействия, но и сохранением постоянного объема и формы (кристаллы).

В общем, твердые тела, в зависимости от различных свойств, делятся на кристаллы и аморфные тела. Характерной особенностью кристаллических тел является их анизотропность, т. е. зависимость физических свойств (оптических, тепловых, упругих и др.) от направления.

Равносильность всех направлений называется *изотропностью*, а неравносильность — *анизотропией*.

**Аморфные тела изотропны.** Газы и большинство жидкостей также являются изотропными веществами.

Причина анизотропии кристаллов — это образование частицами (атомы, молекулы, ионы) фазовой решетки и упорядоченное расположение.

*Кристаллической решеткой* называется расположение частиц, характеризующихся периодической повторяемостью в трех измерениях. Точки, в которых расположены частицы, относитель-

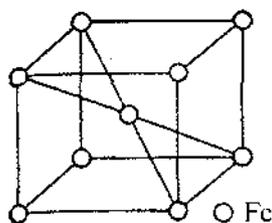


Рис. 81

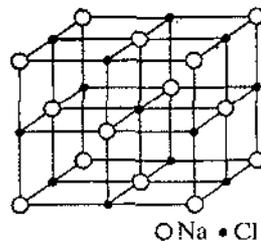


Рис. 82

но которых частицы совершают тепловые колебания, называют узлами кристаллической решетки.

В узле решетки могут располагаться отдельные атомы (рис. 81), атомы или группы ионов (рис. 82). Чтобы понять анизотропию, рассмотрим строение кристалла графита (рис. 83). В этом кристалле атомы углерода располагаются на плоскостях, расположенных друг от друга на определенном расстоянии. Расстояние между атомами, расположенными на одной плоскости, меньше расстояния между плоскостями и, значит, сила притяжения между атомами, расположенными на одной плоскости, больше, чем сила притяжения между атомами, расположенными в разных плоскостях. Поэтому кристалл графита легко сломать в направлении, параллельном плоскости атомов.

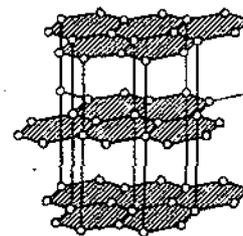


Рис. 83

Повторение места узлов кристаллической решетки носит постоянный характер, т. е. имеет дальний порядок — это свойство, присущее только кристаллическим телам.

Кристаллические тела можно разделить на две группы: монокристаллы и поликристаллы.

**Монокристаллы.** Монокристаллами называют твердые тела, частицы которых образуют единую кристаллическую решетку. Кристаллическая структура монокристаллов обнаруживается по их внешней форме. Большие монокристаллы очень редко встречаются в природе. Но в промышленности, науке и технике потребность в таких кристаллах очень высока. Они имеют большое значение в радиотехнике, оптике, особенно в производстве современной электроники. К примеру, кристалл рубина используется для создания лазерных лучей, а кристалл сегнетовой соли — для возбуждения ультразвуковых колебаний.

Именно поэтому монокристаллы выращиваются искусственно. Сейчас таким способом получают монокристаллы кварца, алмаза, рубина, а также другие редкие кристаллы. Но для их производства нужны определенные условия. Например, чтобы получить кристалл алмаза, необходимо, чтобы давление было  $10^4$  МПа и температура  $200^\circ\text{C}$ .

**Поликристаллы.** Многие твердые тела являются поликристаллами. Они состоят из множества беспорядочно ориентированных мелких кристаллических зерен — кристалликов — маленьких монокристаллов. Каждый монокристалл анизотропен, так как кристаллики располагаются беспорядочно, то поликристаллическое тело бывает изотропным.

Атомы одного химического элемента могут образовывать различные кристаллы. Например, углерод сам может иметь послойное строение графита и резко от него отличающееся объемное строение алмаза. *Полиморфизмом* называется образование разных кристаллических структур с различными физическими свойствами одним и тем же веществом.

**Аморфные тела.** Другой вид твердых тел — это аморфные тела. Хотя они рассматриваются в качестве твердых тел, на самом деле это переохлажденные жидкости.

Если один из атомов аморфного тела рассматривать в качестве центрального атома, то близлежащие к нему атомы располагаются в определенном порядке. Но по мере удаления от центрального атома порядок нарушается, расположение атомов будет различным, т.е. они располагаются случайным образом. В отличие от кристаллических тел, в аморфных телах в расположении атомов наблюдается только ближний порядок. Примером аморфного тела может быть стекло, пластмасса и другие тела. Сера, глицерин, сахар и другие вещества существуют в виде кристаллов и в виде аморфных тел. Эти вещества иногда называются стеклоподобными. Аморфные тела в природе распространены меньше, чем кристаллические.

**Полимеры.** В последнее время в технике все большее применение находят так называемые полимерные вещества. Они получают путем соединения друг с другом молекул с маленькими молекулярными массами (мономеров) и образования органических соединений с большими молекулярными массами. Процесс образования полимеров называется *полимеризацией*. Число мономеров, входящих в состав молекулы полимера, показывает степень полимеризации. Молекулярная масса полимеров может быть очень большой. В зависимости от свойства мономеров при полимеризации могут образоваться как линейные, так и разветвленные молекулярные цепи.

Полимеры делятся на два класса: естественные и синтетические.

К естественным полимерам относятся соединения с высокой молекулярной массой: белки, каучук и другие; к синтетическим относятся различные пластмассы.

Механические свойства полимеров в большинстве случаев зависят от силы взаимодействия между отдельными молекулами. В том числе наличие в полимерах упорядоченных кристаллических областей значительно повышает его прочность. Также имеет большое значение длина молекулярной цепи, ее разветвленность и расположение составных элементов в макромолекуле.

**Свойства полимеров и их применение.** Пластмассы имеют очень много необычных свойств: не подвергаются коррозии; т.е. не окисляются и не разлагаются, выдерживают резкое изменение

температуры: имеют очень большую диэлектрическую проницаемость, прочность, довольно маленькую плотность, способность принимать любую форму и т. д.

Именно по этой причине полимеры очень широко используются в народном хозяйстве. Искусственно созданные полимеры в машиностроении и в приборостроении используются вместо металлов. В строительстве они заменяют деревянные материалы. Из искусственных волокон получают различные материалы и искусственные кожезаменители. Очень большие возможности применения полимеров в медицине. В настоящее время нет области, где бы ни применялись полимеры.



#### Вопросы для самопроверки

1. Каковы свойства твердых тел? 2. Какие бывают виды твердых тел?
3. Что называют анизотропией? 4. Что понимают под анизотропией кристаллических тел? 5. Приведите примеры изотропных тел. 6. В чем заключается причина анизотропии у металлов? 7. Что называют кристаллической решеткой? 8. А узлом кристаллической решетки? 9. Какие вы знаете виды кристаллических тел? 10. Какие тела называют монокристаллами? 11. Какое значение в промышленности имеют монокристаллы? Приведите примеры. 12. Какие кристаллы называют поликристаллами? 13. В чем заключается причина изотропности поликристаллов? 14. Что называют полиморфизмом? 15. Какие тела называют аморфными? 16. Как образуются полимеры? 17. Что такое степень полимеризации? 18. Какие вы знаете виды полимеров? 19. Что входит в степень естественных полимеров? синтетических полимеров? 20. Какие вы знаете причины широкого использования пластмасс? 21. Приведите пять примеров использования полимеров.



#### § 57. Типы кристаллов. Дефекты. Жидкие кристаллы

Содержание: типы кристаллов; дефекты; жидкие кристаллы; применение жидких кристаллов.

**Типы кристаллов.** Имеются два способа деления кристаллов на типы:

1. **Кристаллографический** — в данном методе обращается внимание только на пространственную периодичность в расположении частиц, поэтому можно отвлекаться от их внутренней структуры, рассматривая их как геометрические точки. Этот метод подробно изучается в специальных курсах.

2. **Физический.** В этом методе обращается внимание на природу частиц, расположенных в узлах кристаллической решетки и на характер силы взаимодействия между ними. Именно на основании этих свойств кристаллы делятся на четыре типа: ионные, атомные, металлические, молекулярные.

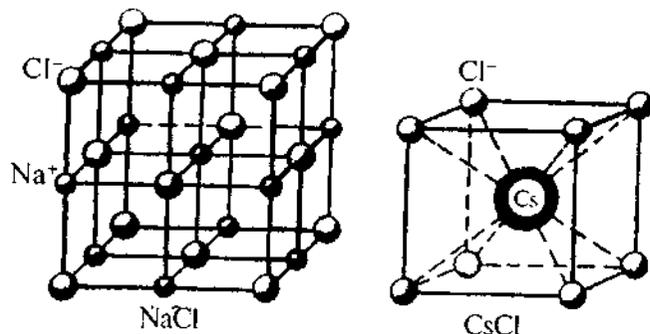


Рис. 84

**Ионные кристаллы.** В узлах кристаллической решетки поочередно располагаются ионы противоположного знака. Силы взаимодействия между ионами являются в основном электростатическими. Ионной связью называется связь, обусловленная кулоновскими силами притяжения между разноименно заряженными ионами. В ионных решетках нельзя выделить отдельные молекулы, так как сам кристалл рассматривается как одна большая молекула. Хорошим примером ионного кристалла может быть поваренная соль NaCl и цезий хлор CsCl (рис. 84).

**Атомные кристаллы.** В узлах кристаллической решетки располагаются нейтральные атомы, удерживающиеся силами квантово-механического происхождения. Характер связи, существующий между ними, — электрический. Эта связь осуществляется посредством одной электронной пары от каждого атома. Число связей, в которых может участвовать атом, определяется его валентностью. Примером атомной связи может быть алмаз, графит (рис. 83), германий и кремний.

**Металлические кристаллы.** В узлах кристаллической решетки располагаются положительные ионы металла. При образовании кристаллической решетки валентные электроны, слабо связанные с атомами, отделяются от него и образуют электронный газ. Теперь они будут принадлежать всему кристаллу в целом. Таким образом, между положительными ионами металла появляются «свободные» электроны и обеспечивают электропроводимость металлов. Связь в металлических кристаллах осуществляется силами притяжения между положительными ионами в узлах решетки и отрицательным электронным облаком. Эти силы притяжения нейтрализуются силами отталкивания между одноименными ионами. Вместе с этим наблюдается симметричное расположение одноименных ионов. Ионы располагаются друг от друга на расстоянии «постоянной решетки». Примерами металлических кристаллов могут быть большинство металлов.

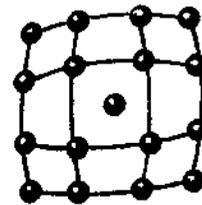


Рис. 85

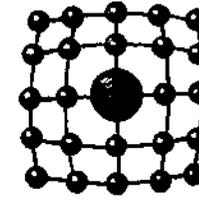


Рис. 86

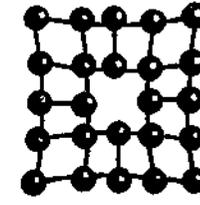


Рис. 87

**Молекулярные кристаллы.** В узлах кристаллической решетки располагаются определенным образом направленные молекулы. Между ними существуют силы притяжения, присущие взаимодействиям молекул. К молекулярным кристаллам относятся нафталин, парафин, сухой лед ( $\text{CO}_2$ ), лед и другие.

**Дефекты<sup>1</sup>.** Идеальные кристаллические структуры имеют место лишь в очень малых объемах реальных кристаллов. В других частях же упорядоченное расположение частиц в узлах кристаллической решетки нарушается, и это называется *дефектами кристаллической решетки*. Причинами дефектов в основном являются: внедрение атомов других элементов, образование свободных мест и смещенное расположение.

Следует отметить, что дефекты в кристаллах оказывают сильное влияние на их физические свойства.

**Внедрение в кристаллическую решетку атомов других элементов.** В этом случае постоянный атом может внедриться в междоузельное пространство (рис. 85) или на место основного вещества в кристаллической решетке (рис. 86).

**Вакансия.** В узле кристаллической решетки может отсутствовать атом (рис. 87).

**Расположение со сдвигом.** Один из атомных слоев может расположиться со сдвигом. Это в основном происходит, когда кристалл подвергается деформации сдвига и приводит к тому, что один из атомных слоев расположится со сдвигом относительно другого.

**Жидкие кристаллы.** Некоторые органические вещества имеют такое состояние, при котором они, обладая свойством текучести как у жидкости, имеют расположение молекул как у кристаллов и по некоторым физическим свойствам обладают свойством анизотропности. Такое состояние химических соединений называется состоянием *жидкого кристалла*. В настоящее время число соединений с жидкокристаллическими свойствами перевалило за тысячу. Обычно жидкие кристаллы создаются плавлением твердых кристаллов.

Жидкие кристаллы по некоторым своим свойствам, таким как упругость, электропроводность, магнитная проницаемость,

<sup>1</sup> Дефект — от лат. defectus — недостаток, изъян.

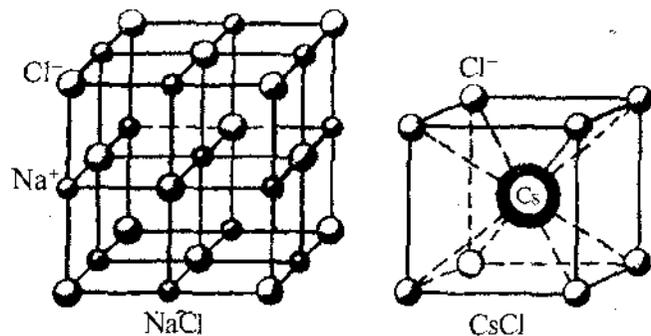


Рис. 84

**Ионные кристаллы.** В узлах кристаллической решетки поочередно располагаются ионы противоположного знака. Силы взаимодействия между ионами являются в основном электростатическими. Ионной связью называется связь, обусловленная кулоновскими силами притяжения между разноименно заряженными ионами. В ионных решетках нельзя выделить отдельные молекулы, так как сам кристалл рассматривается как одна большая молекула. Хорошим примером ионного кристалла может быть поваренная соль  $\text{NaCl}$  и цезий хлор  $\text{CsCl}$  (рис. 84).

**Атомные кристаллы.** В узлах кристаллической решетки располагаются нейтральные атомы, удерживаемые силами квантово-механического происхождения. Характер связи, существующий между ними, — электрический. Эта связь осуществляется посредством одной электронной пары от каждого атома. Число связей, в которых может участвовать атом, определяется его валентностью. Примером атомной связи может быть алмаз, графит (рис. 83), германий и кремний.

**Металлические кристаллы.** В узлах кристаллической решетки располагаются положительные ионы металла. При образовании кристаллической решетки валентные электроны, слабо связанные с атомами, отделяются от него и образуют электронный газ. Теперь они будут принадлежать всему кристаллу в целом. Таким образом, между положительными ионами металла появляются «свободные» электроны и обеспечивают электропроводимость металлов. Связь в металлических кристаллах осуществляется силами притяжения между положительными ионами в узлах решетки и отрицательным электронным облаком. Эти силы притяжения нейтрализуются силами отталкивания между одноименными ионами. Вместе с этим наблюдается симметричное расположение одноименных ионов. Ионы располагаются друг от друга на расстоянии «постоянной решетки». Примерами металлических кристаллов могут быть большинство металлов.

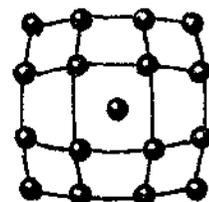


Рис. 85

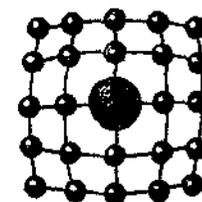


Рис. 86

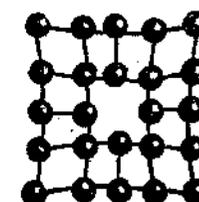


Рис. 87

**Молекулярные кристаллы.** В узлах кристаллической решетки располагаются определенным образом направленные молекулы. Между ними существуют силы притяжения, присущие взаимодействиям молекул. К молекулярным кристаллам относятся нафталин, парафин, сухой лед ( $\text{CO}_2$ ), лед и другие.

**Дефекты<sup>1</sup>.** Идеальные кристаллические структуры имеют место лишь в очень малых объемах реальных кристаллов. В других частях же упорядоченное расположение частиц в узлах кристаллической решетки нарушается, и это называется *дефектами кристаллической решетки*. Причинами дефектов в основном являются: внедрение атомов других элементов, образование свободных мест и смещенное расположение.

Следует отметить, что дефекты в кристаллах оказывают сильное влияние на их физические свойства.

**Внедрение в кристаллическую решетку атомов других элементов.** В этом случае постоянный атом может внедриться в междоузельное пространство (рис. 85) или на место основного вещества в кристаллической решетке (рис. 86).

**Вакансия.** В узле кристаллической решетки может отсутствовать атом (рис. 87).

**Расположение со сдвигом.** Один из атомных слоев может расположиться со сдвигом. Это в основном происходит, когда кристалл подвергается деформации сдвига и приводит к тому, что один из атомных слоев расположится со сдвигом относительно другого.

**Жидкие кристаллы.** Некоторые органические вещества имеют такое состояние, при котором они, обладая свойством текучести как у жидкости, имеют расположение молекул как у кристаллов и по некоторым физическим свойствам обладают свойством анизотропности. Такое состояние химических соединений называется состоянием *жидкого кристалла*. В настоящее время число соединений с жидкокристаллическими свойствами перевалило за тысячу. Обычно жидкие кристаллы создаются плавлением твердых кристаллов.

Жидкие кристаллы по некоторым своим свойствам, таким как упругость, электропроводность, магнитная проницаемость,

<sup>1</sup> Дефект — от лат. defectus — недостаток, изъян.

диэлектрическая проницаемость, оптическая и некоторые другие имеют свойство анизотропии.

**Применение жидких кристаллов.** В настоящее время жидкие кристаллы находят широкое применение. Они используются в производстве цифровых экранов электронно-счетных машин, электронных часов, микрокалькуляторов, рекламных щитов. В телевизорах с плоским экраном и мониторах тоже используются жидкие кристаллы. Еще полностью не использованы возможности их применения в медицине в качестве точных приборов и в устройствах контроля.



### Вопросы для самопроверки

1. Какие способы имеются для разделения кристаллов на типы и в чем их значение? 2. Какие типы кристаллов образуются физическим методом? 3. Какие кристаллы называют ионными кристаллами? Приведите примеры. 4. Какие связи называют ионными? 5. Какие кристаллы называют атомными? Приведите примеры. 6. Какие силы удерживают нейтральные атомы в узлах кристаллической решетки? 7. Какие кристаллы называют металлическими? 8. Как образуются свободные электроны в металлических кристаллах? 9. Как обеспечиваются связи в металлических кристаллах? 10. Какие кристаллы называют молекулярными? Приведите примеры. 11. Что называют дефектом кристаллической решетки? 12. Что происходит при внедрении атома другого элемента в кристаллическую решетку? 13. Что понимают под вакансией? 14. Что понимают под смещенным расположением? 15. Какое состояние называют жидкокристаллическим? 16. Как обычно образуются жидкие кристаллы? 17. Какие анизотропные свойства имеют жидкие кристаллы? 18. Где применяются жидкие кристаллы?



**С о д е р ж а н и е :** деформация твердого тела; деформация и строение твердого тела; прочность материала; диаграмма растяжения; пластичность вещества; хрупкость вещества; твердость вещества.

**Деформация твердого тела.** В разделе механика мы останавливались на деформации твердого тела. Следует отметить, что тело изменяет свою форму, а значит и внутреннюю энергию не только за счет действия внешней силы, но и при нагревании и охлаждении.

*Деформацией твердого тела* называется изменение объема и формы тела под действием внешней силы при нагревании или остывании. Если после прекращения действия внешних сил тело полностью восстанавливает свое прежнее состояние, то такую деформацию называют *упругой*, а если не восстанавливает — *пластической*. Веще-

ства имеют свойства упругости и пластичности. Например, сталь, резина, кожа — упругие вещества, а медь, воск — пластичные.

**Деформация и строение твердого тела.** В результате деформации происходит смещение относительно друг друга частиц, расположенных в узлах кристаллической решетки. Это в свою очередь приводит к нарушению равновесия силы взаимодействия, возникшему между частицами. В результате возникает внутренняя сила упругости  $F_{упр}$ , которая стремится вернуть частицы в исходное состояние. Следует отметить, что для осуществления любой деформации совершается работа или передается количество теплоты, значит, изменение внутренней энергии деформируемого тела равно работе, совершенной под действием внешних сил или переданной количеству теплоты. К примеру, потенциальная энергия упруго растянутой или сжатой пружины изменяется следующим образом:

$$E_{II} = A = \frac{1}{2} \cdot \frac{ES}{l} \cdot (\Delta l)^2,$$

где  $A$  — работа внешних сил, совершивших эту деформацию;  $S$  — площадь поперечного сечения деформируемого тела;  $l$  — длина;  $E$  — модуль Юнга.

Видно, что потенциальная энергия упруго растянутого стержня прямо пропорциональна квадрату деформации  $(\Delta l)^2$ .

**Прочность материала.** При проектировании различных установок необходимо учитывать прочность материалов. Прочностью материала называют нагрузку, которую выдерживает материал не разрушаясь. Границей твердости  $\sigma_A$  называют самое большое значение нормального механического напряжения, которое выдерживает груз.

Пределом упругости  $\sigma_A$  называется граничное значение, при котором еще сохраняется пропорциональность между деформацией  $\sigma_A$  и силой, приложенной к нему.

**Диаграмма напряжения.** Теперь рассмотрим график зависимости напряжения  $\sigma_A$  от относительного удлинения  $\epsilon$ , названный *диаграммой напряжения* (рис. 88).

Области диаграммы  $OA$ , где выполняется закон Гука, соответствует упругая деформация.  $\sigma_A$  — граница упругости, которая зависит от вида материала и составляет для стали  $5 \cdot 10^8$  Па, для меди  $1,2 \cdot 10^8$  Па. Области  $ABCD$  соответствует пластическая деформация. В области  $AB$  относительная деформация растет быстрее механичес-

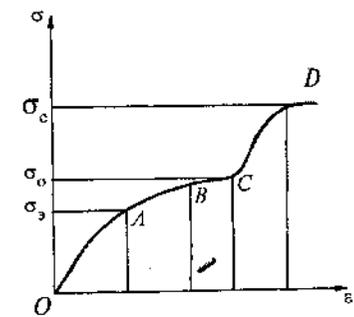


Рис. 88

Итак, в СИ  $[\alpha] = \text{K}^{-1}$ . На практике для очень большого числа веществ его значение не зависит от температуры.

Таблица 4

Температурный коэффициент линейного расширения для некоторых веществ при температуре 273 К

Вещества	$\alpha, 10^6 \text{ K}^{-1}$	Вещества	$\alpha, 10^6 \text{ K}^{-1}$
Алюминий	24	Свинец	29
Вольфрам	4	Стекло:	
Дерево:		простой	10
по волокну	6	кварцевый	0,7
поперек	30	Суперинвар	0,03
Железо	12	(соединение железа,	
Инвар (железо и никель)	0,9	никеля и хрома)	
Цинк	18	Цинк	30
Латунь	18	Фарфор	3
Медь	17		

**Объемное расширение.** Нагреем тело объемом  $V_0$  при температуре  $T_0$  до температуры  $T$ , т.е.  $\Delta T = T - T_0$ . В результате объем тела увеличится до  $V$ , т.е.  $\Delta V = V - V_0$ .

Объем нагретого тела линейно зависит от изменения температуры:

$$V = V_0(1 + \beta \cdot \Delta T), \quad (59.3)$$

где  $\beta$  — температурный коэффициент объемного расширения.

Если из (59.3) найдем  $\beta$ , то получим

$$\beta = \frac{1}{\Delta T} \frac{\Delta V}{V_0}. \quad (59.4)$$

Значит,  $\beta$  определяется отношением относительного расширения объема тела  $\frac{\Delta V}{V_0}$  к изменению температуры  $\Delta T$ . Другими словами,  $\beta$  показывает, насколько, изменится объем от первоначального объема при изменении температуры на 1 К.

Если учесть, что  $V = l^3$ , то можно найти, что между температурными коэффициентами линейного и объемного расширения существует связь

$$\beta = 3\alpha.$$

**Расширение жидкостей при нагревании.** При нагревании жидкости растет средняя кинетическая энергия беспорядочного движения молекул. Это в свою очередь приводит к увеличению рас-

стояния между молекулами. В результате увеличивается объем жидкости. Как и в твердых телах, тепловое расширение жидкостей определяется температурным коэффициентом объемного расширения. Объем нагретой жидкости определяется выражением (59.3).

Таблица 5

Температурный коэффициент объемного расширения для некоторых веществ при температуре 273 К

Вещество	$\beta, 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
Ртуть	0,54
Керосин	3,0
Спирт	3,3
Эфир	1,7

**Плотность нагретой жидкости.** Известно, что плотность определяется выражением  $\rho = \frac{m}{V}$ . Значит, если при нагревании у жидкости увеличивается объем, то ее плотность уменьшается.

Чтобы определить зависимость изменения плотности от температуры, обозначим плотности жидкости при температуре  $T_0$  и  $T$  соответственно  $\rho_0$  и  $\rho$ , учитывая что  $V = \frac{m}{\rho}$ , а также при помощи (59.3) получим:

$$\frac{m}{\rho} = \frac{m}{\rho_0}(1 + \beta \cdot \Delta T),$$

или

$$\rho = \frac{\rho_0}{(1 + \beta \cdot \Delta T)}.$$

**Учет теплового расширения в технике и в быту.** При изготовлении различных изделий, машин учитывается тепловое расширение материалов, из которых они изготавливаются. К примеру, если в электрических установках возникает необходимость сплавлять различные металлы или металлы со стеклом, приходится выбирать, чтобы их температурные коэффициенты линейного расширения были близки друг к другу. В противном случае в результате нагревания или остывания возникает механическое напряжение и прибор может выйти из строя.

Узлы большинства машин и механизмов, расширение которых не целесообразно, изготавливаются из инвара. Чтобы показания не зависели от температуры, маятники часов, геодезические приборы для измерения длины тоже изготавливаются из инвара.

При прокладке трубопроводов в определенных местах делают изгибы в виде горба. Эти изгибы предохраняют трубопровод от поломки при изменении длины от нагревания или остывания.

Электрические провода делают с провисанием, при этом учитывается расширение проводов при нагревании. У электрических транспортных средств проводники натягиваются при помощи грузиков и т. д.

В технике необходимо учитывать расширение жидкостей при нагревании. Если в закрытом сосуде нагревать жидкость, сосуд может лопнуть. Поэтому при заполнении водой различных сосудов их неплотно закрывают или учитывают увеличение объема жидкости, и оставляя свободное место.

**Зависимость плотности жидкости от температуры.** Из выражения (59.6) видно, что при повышении температуры плотность жидкости уменьшается. Но вода составляет исключение.

Опыты показывают, что вода достигает своей наибольшей плотности при  $4^{\circ}\text{C}$ . Причиной этому являются особые свойства кристаллической решетки воды. Если в жидком состоянии молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  плотно прилегают друг к другу, то при кристаллизации расстояние между молекулами увеличивается и между молекулами кристалла льда образуются пустоты. В результате объем воды при замерзании увеличивается.

Плотность воды при температуре  $4^{\circ}\text{C}$  достигает своего самого большого значения и становится больше, чем у льда. Поэтому лед плавает на поверхности воды. При температуре воды выше и ниже  $4^{\circ}\text{C}$  ее плотность уменьшается и, значит, увеличивается объем.

**Влияние изменения плотности воды на природу.** Из-за того, что 70% поверхности Земли покрыта водой, своеобразное свойство расширения при нагревании оказывает большое влияние на погоду. Явным примером этому может быть непрерывное смешивание слоев воды с разными температурами в водоемах. До достижения водой температуры  $4^{\circ}\text{C}$  плотность теплой воды будет меньше плотности холодной воды, и поэтому теплая вода поднимается вверх, а холодная опускается вниз.

В температурном интервале от 0 до  $4^{\circ}\text{C}$  происходит обратный процесс. Теперь более теплая вода опускается вниз, а более холодная поднимается вверх, еще больше охлаждается и замерзает. Поэтому в водоемах верхние слои замерзают, а нижние нет. В результате водоемы не промерзают до дна, этим самым сохраняется жизнь рыбам и другим живым организмам.

**Расширение воды при замерзании и следствия этого явления.** Как было отмечено выше, при замерзании воды расстояние между ее молекулами увеличивается, а значит, увеличивается и объем замерзшей воды. Это приводит к разрушению горных пород.

Вода, просочившаяся внутрь породы, замерзает, объем ее увеличивается и разрушает породу. Также сосуды с водой в результате замерзания воды лопаются. Чтобы предотвратить это, пользуются различными методами. Например, в радиаторы автомобилей вместо воды наливают жидкость, которая не замерзает при низкой температуре.



### Вопросы для самопроверки

1. Что называют расширением при нагревании? 2. В чем заключается причина расширения при нагревании? 3. Напишите зависимость длины нагретого тела от температуры. 4. Какой физический смысл температурного линейного расширения и какова единица его измерения? 5. Зависит ли объем нагретого тела от температуры? 6. Какой физический смысл температурного коэффициента объемного расширения и единица измерения? 7. Какая связь существует между температурными коэффициентами линейного и объемного расширения? 8. Как объясняется увеличение объема нагретой жидкости? 9. Каким выражением определяется изменение объема нагретой жидкости? 10. Как изменится объем нагретой жидкости? 11. Объясните изменение объема нагретой жидкости. 12. Учитывается ли расширение различных материалов при их сплавлении? 13. Какие свойства имеет инвар? 14. В чем заключается причина провисания электрических проводов? 15. Как учитывается в технике расширение жидкостей при нагревании? 16. Как меняется плотность жидкости с повышением температуры? 17. Когда вода достигает своей наибольшей плотности? 18. Как увеличивается объем льда? 19. Почему кусок льда плавает на поверхности воды? 20. В чем причина замерзания в водоемах верхнего слоя воды и незамерзания нижнего? 21. В чем причина разрушения горных пород? 22. Почему при замерзании сосуды или трубы с водой лопаются? 23. Почему в радиаторы автомобилей заливают жидкость, не замерзающую при низких температурах?



### Образцы решения задач

**Задача 1.** В сосуде объемом  $10\text{ л}$  находится азот массой  $0,25\text{ кг}$ . Найдите: 1) внутреннее давление газа  $p'$ ; 2) собственный объем молекул  $V'$ .

**Дано:**

$$V = 10\text{ л} = 10^{-2}\text{ м}^3;$$

$$m = 0,25\text{ кг}.$$

$$p' = ?$$

$$V' = ?$$

**Решение.** Внутреннее давление газа определяется формулой

$$p' = \nu^2 \frac{a}{V^2} = \left( \frac{m}{M} \right) \frac{a}{V^2}.$$

Если учесть, что для азота  $a = 0,135 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{моль}^2}$

и  $M = 28 \cdot 10^{-3}\text{ кг/моль}$ ,

**Испарение.** Переход вещества в парообразное (газообразное) состояние называется *испарением*.

Состояние, когда исчезает разница между жидкостью и газом, называется *критическим состоянием*.

Понятие *влажность* введено для характеристики количества водяного пара в атмосфере.

*Относительная влажность* определяется как  $f = \frac{D}{D_0} \cdot 100\%$ .

*Кипением* называется процесс парообразования в результате интенсивного образования пузырьков пара не только на свободной поверхности, но и по всему объему жидкости.

*Удельной теплотой* парообразования называется количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг жидкости в пар:

$$r = \frac{Q}{m}. \text{ Единица в СИ — } 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

*Поверхностным натяжением* называют силу поверхностного натяжения, приходящуюся на единицу длины контура, стягивающего поверхность:

$$\alpha = \frac{F}{l}. \text{ Единица в СИ — } 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Высота подъема жидкости по капиллярным трубкам  $h = \frac{2\alpha}{\rho \cdot g \cdot R}$ .

Твердые тела в зависимости от свойства делятся на *кристаллические* и *аморфные*.

*Тепловым расширением* называют увеличение линейных размеров и объемов тел, происходящее при повышении температуры.

Линейная зависимость длины тела от изменения температуры  $l = l_0 (1 + \alpha \Delta T)$ . Линейная зависимость объема тела от изменения температуры  $V = V_0 (1 + \beta \Delta T)$ .



Электродинамика — это раздел физики, изучающий законы электромагнитного поля, осуществляющего взаимодействие между электрически заряженными частицами.

Самые простые электрические и магнитные явления были известны людям с древнейших времен. До систематизации этих явлений было проведено множество опытов и сделано открытий. В 1782 году французский физик Ш. Кулон (1736—1806) открыл закон взаимодействия между точечными зарядами. В 1820 году датский физик Эрстед (1777—1851) открыл существование магнитного поля вокруг электрического тока. В 1831 году М. Фарадей (1791—1867) открыл закон электромагнитной индукции, английский ученый Дж. Максвелл (1831—1879) создал основные законы электродинамики и в 1867 году объявил о них. Своей теорией он доказал существование электромагнитного поля. Немецкий физик Г. Герц (1857—1894) доказал на опыте о существовании электромагнитных волн, подтвердив теорию Максвелла.



Электрическое поле есть форма проявления электромагнитного поля (вместе с магнитным полем). Оно действует на неподвижный заряд. Понятие об электрическом поле было введено М. Фарадеем. По его представлению, каждый неподвижный электрический заряд создает вокруг себя электрическое поле. Эти заряды взаимодействуют друг с другом при помощи своих полей. Электрическое поле вокруг неподвижного заряда называется электростатическим полем. Данная глава посвящается изучению электростатического поля.



**Содержание:** электрический заряд; дискретность электрического заряда; электромагнитное взаимодействие; электризация тел; закон сохранения электрического заряда; единица электрического заряда в СИ; количество электронов в веществе.

**Электрический заряд.** С древнейших времен было известно, что если потереть янтарную палочку о шерсть, она приобретает свойство притягивать легкие тела. Английский медик Жилберт (в конце XVI века) назвал свойство тел притягивать более легкие тела *электризацией*. Несмотря на многообразие веществ в природе, существует только два вида зарядов противоположного знака. Американский физик Р. Милликен (1868—1953) опытным путем доказал, что электрический заряд дискретен, т.е. заряд любого тела составляет целое от некоторого элементарного заряда  $e (e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})$ . Другими словами, заряд любого тела должен быть  $q = \pm Ne$ , ( $N$ —целое число). Электрон ( $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ ) и протон ( $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ ) соответственно отрицательно и положительно заряженные элементарные частицы.

**Электромагнитное взаимодействие.** Как было рассмотрено выше, любое тело, кроме массы, характеризуется еще и зарядом. И между ними существует не только гравитационное, но и электромагнитное взаимодействие. Одноименные заряды друг от друга отталкиваются, а разноименные — притягиваются. Следует отметить, что электромагнитное взаимодействие во много раз больше гравитационного. Наряду с этим гравитационное взаимодействие присуще всем телам, а электромагнитное — только заряженным телам. Сила электромагнитного взаимодействия зависит от количества зарядов в теле.

**Электризация тел.** Все тела в природе имеют свойство наэлектризовываться. Электризация тел осуществляется различными способами. Самый простой из них — потереть одно тело о другое. \*\* Например, стеклянная палочка, потертая о кожу, заряжается  $N$  положительно, а янтарная палочка, потертая о шерсть, заряжается отрицательно. Каким образом эти заряды образуются? Следует отметить, что во всех телах имеются электрические заряды. Только в электронейтральных, т.е. в ненаэлектризованных телах, количество положительных и отрицательных зарядов равно. Если потереть палочку о ткань, то это приведет не к появлению зарядов, а к их перераспределению. В результате на одном конце палочки соберется больше положительных зарядов, на другом же больше останется отрицательных зарядов. В системе палочка-материя число зарядов останется постоянным, т.е. алгебраическая сумма зарядов, образующихся в каком-то процессе, остается равной нулю.

**Закон сохранения электрических зарядов.** Из обобщения опытных данных, а также на основе своих опытов, английский физик М. Фарадей в 1843 году сформулировал один из фундаментальных законов природы — закон сохранения электрического заряда: **В любой замкнутой системе, независимо от того, какие процессы происходят внутри этой системы, алгебраическая сумма зарядов всех частиц остается неизменной:**

$$\sum_{i=1}^n Q_i = \text{const}, \quad (60.1)$$

где  $n$  — число зарядов в системе.

*Замкнутой системой* называется система, не обменивающаяся зарядами с внешними телами.

**Электрические заряды не появляются и не исчезают, они лишь передаются из одного тела в другое или перераспределяются внутри системы.**

Электрический заряд является релятивистски инвариантной величиной, т.е. абсолютно не зависит от системы отсчета, а значит, не зависит от того, движется этот заряд или покоится.

**Единица электрического заряда в СИ** является производной величиной и равна заряду, проходящему через поперечное сечение проводника при токе силой 1 А за время 1 с. Это количество заряда называется 1 кулон (Кл).

**Количество электронов в веществе.** В зависимости от количества свободных электронов в веществе они делятся на проводники, диэлектрики и полупроводники. Проводниками называются вещества, свободно проводящие электрические заряды по всему объему. Они делятся на две группы: 1) проводники первого рода (металлы) — перенесение в них зарядов (свободных электронов) не сопровождается химическими превращениями; 2) проводники второго рода (растворы) — перенесение в них зарядов ведет к химическим изменениям. Вещества, в которых практически отсутствуют свободные электроны, называют *диэлектриками* (стекло, пластмасса). Полупроводники (германий, кремний и др.) занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками.



### Вопросы для самопроверки

1. Что изучает раздел электродинамика?
2. Когда люди стали замечать электрические явления?
3. Кем было введено в науку понятие электризации?
4. Что определил Р. Милликен в своих опытах?
5. Какие существуют электрические заряды?
6. Что вы понимаете под дискретностью электрических зарядов?
7. Что вы знаете о протонах и нейтронах?
8. Какое взаимодействие существует между заряженными частицами?
9. Всем ли телам присуще электромагнитное взаимодействие? А гравитационное взаимодействие?
10. Чем характеризуется количество электричества?
11. Какое взаимодействие сильнее: гравитационное или электрическое?
12. Какие существуют методы электризации тел?
13. Откуда у тел появляются заряды?
14. Чему равна алгебраическая сумма зарядов, образующихся в каком-либо процессе?
15. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда.
16. Какая система называется замкнутой?
17. Зависит ли количество электрического заряда от выбора системы отсчета?
18. Какова единица электрического заряда в СИ?



## § 61. Закон Кулона



Ш. Кулон  
(1736—1806)

**Содержание:** понятие точечного заряда; закон Кулона; направление силы Кулона; коэффициент пропорциональности и электрическая постоянная.

**Точечный заряд.** Точечным называется заряд, сосредоточенный на теле, линейные размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которыми он взаимодействует. Как и материальная точка, понятие точечного заряда идеализированное.

**Закон Кулона.** Сила взаимодействия между неподвижными точечными зарядами была определена в 1785 году французским физиком Ш. Кулоном. Он также выполнил свой опыт при помощи крутильных весов, похожих на прибор, который Кавендиш использовал при определении гравитационной постоянной (рис. 89.)

Крутильные весы состоят из стеклянной палочки, подвешенной на тонкой упругой проволоке. Проволока установлена в стеклянном цилиндрическом сосуде. Верхний конец проволоки прикреплен к устройству, позволяющему определить угол закручивания. На одном конце стеклянной палочки закреплен маленький металлический шарик, а на другом — противовес. Через отверстие на крышке сосуда можно опускать точно такой же шарик. Если шарам сообщить заряд, они будут взаимодействовать и по углу закручивания проволоки появляется возможность оценить силу взаимодействия шариков.

**Закон Кулона:** Сила взаимодействия  $\vec{F}$  между двумя неподвижными точечными зарядами  $q_1$  и  $q_2$  в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$  между ними:

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}, \quad (61.1)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц.

**Направление силы Кулона.** Сила взаимодействия  $\vec{F}$  двух точечных неподвижных зарядов направлена по прямой, соединяющей взаимодей-

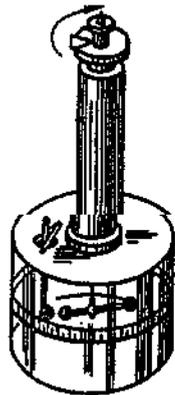


Рис. 89

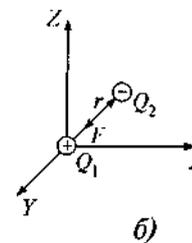
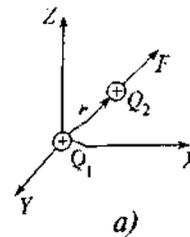


Рис. 90

ствующие заряды, соответствует притяжению ( $F < 0$ ) в случае разноименных зарядов и отталкиванию ( $F > 0$ ) в случае одноименных зарядов (рис. 90).

В векторной форме закон Кулона имеет следующий вид:

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{r}. \quad (61.2)$$

**Коэффициент пропорциональности.** В СИ коэффициент пропорциональности принимается равным

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{м}}{\text{Ф}}, \quad (61.3)$$

однако здесь ( $\Phi$ ) — единица электрической емкости. Тогда закон Кулона запишется в окончательном виде:

$$q = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (61.4)$$

где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная. Она относится к числу фундаментальных физических постоянных и равна:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}. \quad (61.5)$$



### Вопросы для самопроверки

1. Что называют точечным зарядом и определен ли он?
2. Сформулируйте закон Кулона.
3. Объясните опыт Кулона.
4. Как направлена кулоновская сила?
5. Какой характер имеют силы отталкивания между зарядами?
6. Чему равен в СИ коэффициент пропорциональности в законе Кулона?
7. Чему равно значение электрической постоянной?



## § 62. Электростатическое поле. Напряженность электростатического поля

**Содержание:** Понятия электростатического поля; напряженность электростатического поля; единица напряженности электростатического поля; однородное поле.

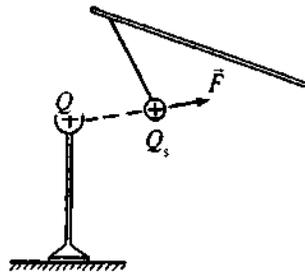


Рис. 91

**Электростатическое поле.** Если к электрическому заряду поднести другой заряд, то на него будет действовать кулоновская сила (рис. 91). Значит, вокруг заряда существует поле. Это поле называют электрическим полем. Если заряд неподвижен, то такое поле называют *электростатическим*.

Электростатическое поле остается постоянным со временем и его создает только электрический заряд.

Электрическое поле тоже является одним из особых видов материи, оно связано с электрическим зарядом и передает воздействие зарядов друг на друга. На рисунке 91 приводится случай, когда в поле, создаваемом зарядом  $q$ , вводится пробный заряд  $q_0$ . Здесь заряд  $q_0$  выполняет роль пробного заряда. Обычно в роли пробного заряда берется положительный заряд. Вместе с этим считается, что поле пробного заряда очень маленькое и оно не может повлиять на изучаемое поле. На пробный заряд  $q_0$ , помещенный в поле заряда  $q$ , действует сила

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q_0}{r^2} \vec{r} \quad (62.1)$$

**Напряженность электростатического поля.** Как видно из выражения (62.1), отношение  $\frac{F}{q_0}$  не зависит от пробного заряда и является величиной, характеризующей точку поля, где пробный заряд находится. Эта величина называется *напряженностью*, она является силовой характеристикой электростатического поля.

*Напряженность электростатического поля в данной точке — это физическая величина, определяемая силой, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в эту точку поля.*

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (62.2)$$

На основании (62.1) и (62.2) найдем напряженность электростатического поля в вакууме:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \vec{r} \quad (62.3)$$

или в скалярной форме:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}, \quad (62.4)$$

где  $\vec{E}$  — векторная величина, ее направление совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд, помещенный в поле. Если поле создается положительным зарядом,  $\vec{E}$  направлена от заряда (в сторону отталкивания пробного заряда), если поле создается отрицательным зарядом,  $\vec{E}$  направлена к заряду (в сторону притяжения пробного заряда).

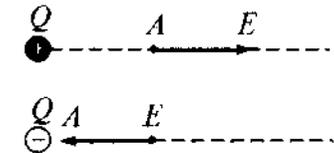


Рис. 92

На рисунке 92 показана напряженность поля, созданного положительным и отрицательным зарядами в точке A.

**Единица напряженности электростатического поля.** Как видно из выражения (62.2), единица напряженности электростатического поля в СИ —  $1 \frac{Н}{Кл}$ .

$$[E] = \frac{[F]}{[q]} = 1 \frac{Н}{Кл} = 1 \frac{В}{м}.$$

$1 \frac{Н}{Кл}$  — это напряженность такого поля, которое на точечный заряд 1 Кл действует силой в 1 Н. Часто пользуются и другой единицей напряженности.  $1 \frac{В}{м} = 1 \frac{Н}{Кл}$ , здесь В (вольт) — единица потенциала электростатического поля.

**Линии напряженности.** Очень удобно изображать электростатическое поле графически с помощью линий напряженности.

*Силовыми линиями поля*, или линиями напряженности, называют непрерывные линии, касательные к которым в каждой точке пространства совпадают с направлением напряженности (рис. 93).

Линии напряженности никогда не пересекаются и не имеют характер закрытых линий. Они имеют начало и конец или пересекаются в бесконечности. Это свойство — результат существования в природе зарядов двух типов.

Условно принято, что силовые линии выходят из положительного заряда и входят в отрицательный заряд (рис. 94).

Чтобы с помощью линий напряженности можно было характеризовать не

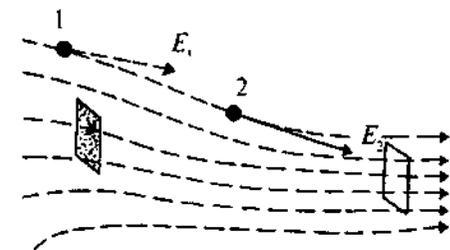


Рис. 93

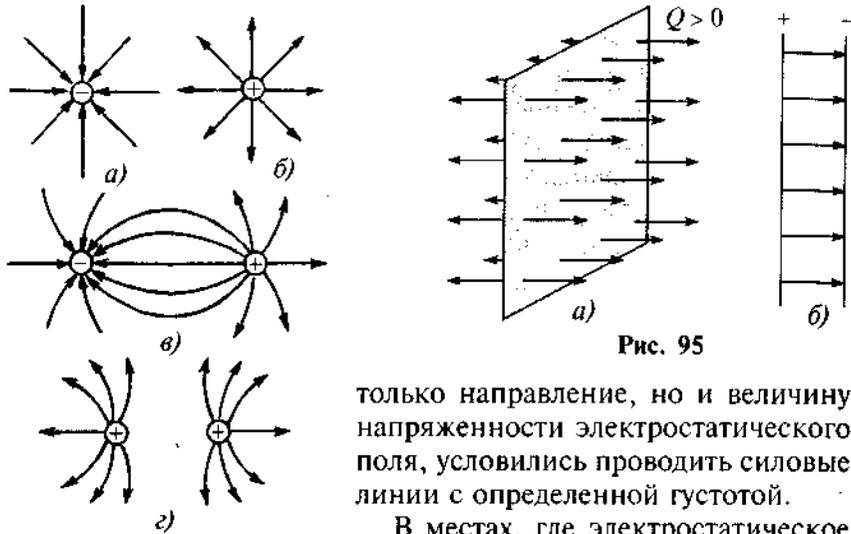


Рис. 95

Рис. 94

только направление, но и величину напряженности электростатического поля, условившись проводить силовые линии с определенной густотой.

В местах, где электростатическое поле сильнее, пустота силовых линий больше и, наоборот, в местах, где поле

слабее, густота силовых линий меньше.

**Однородное поле.** Электрическое поле, напряженность которого в любой точке поля постоянна по величине и направлению ( $\vec{E} = \text{const}$ ), называют *однородным*.

Примером однородного поля может быть поле равномерно заряженной плоскости (рис. 95 а) и поле между пластинками плоского конденсатора вдали от краев пластин (рис. 95 б).



### Вопросы для самопроверки

1. Как можно определить, что вокруг электрического заряда существует поле?
2. Какое поле называют электростатическим?
3. Изменяется ли со временем электростатическое поле?
4. Является ли электрическое поле одним из видов материи или нет?
5. Какой заряд называют пробным?
6. Какая сила действует на пробный заряд, помещенный в поле?
7. Какую величину называют напряженностью электростатического поля?
8. Зависит ли напряженность от величины пробного заряда?
9. Какой характеристикой электростатического поля является напряженность?
10. Дайте определение напряженности электростатического поля, точечному заряду и его направлению.
11. Что вы знаете о направлении напряженности поля положительного и отрицательного зарядов?
12. В чем измеряется единица напряженности электростатического поля?
13. Какие линии называют линиями напряженности?
14. С какой целью введено понятие линии напряженности?
15. Где пересекаются силовые линии электростатического поля?
16. Где

начинаются и где кончаются силовые линии электростатического поля? 17. Что показывает наличие начала и конца силовых линий электростатического поля? 18. Могут ли линии напряженности характеризовать величину напряженности электростатического поля? 19. Какое поле называют однородным? 20. Приведите пример однородного поля.



### § 63. Принцип суперпозиции электростатического поля. Поле диполя

**Содержание:** принцип суперпозиции электростатического поля, напряженность поля двух зарядов; поле диполя.

**Принцип суперпозиции.** Пусть требуется определить величину и направление вектора напряженности  $\vec{E}$  в каждой точке электростатического поля, создаваемого системой неподвижных зарядов  $q_1, q_2, \dots, q_n$ . Для этого воспользуемся использованным в разделе механики принципом независимости действия силы, т.е. результирующая сила  $\vec{F}$ , действующая со стороны поля на пробный заряд  $q_0$ , равна векторной сумме сил  $\vec{F}_i$ , приложенных к нему со стороны каждого из зарядов  $q_i$ .

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n \quad (63.1)$$

Если  $\vec{F} = q_0 \vec{E}$ , и учитывая, что  $\vec{F}_1 = q_0 \vec{E}_1$ ,  $\vec{F}_2 = q_0 \vec{E}_2$ , ...,  $\vec{F}_n = q_0 \vec{E}_n$  подставим их в (63.1), то получим следующее:

$$q_0 \cdot \vec{E} = q_0 \vec{E}_1 + q_0 \vec{E}_2 + \dots + q_0 \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n (q_0 \vec{E}_i) = q_0 \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$$

где  $\vec{E}$  — напряженность результирующего поля,  $\vec{E}_i$  — напряженность поля, создаваемого каждым зарядом  $q_i$ .

Сократим выражение на  $q_0$ :

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i \quad (63.2)$$

Формула (63.2) выражает принцип суперпозиции электростатических полей. Напряженность поля  $\vec{E}_i$ , создаваемого системой зарядов, равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых в данной точке каждым из зарядов в отдельности.

Принцип суперпозиции позволяет рассчитать электростатические поля любой системы неподвижных зарядов.

**Напряженность поля, созданного двумя зарядами.** Самый простой способ — это найти напряженность поля в точке А,

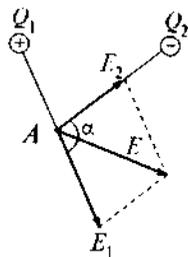


Рис. 96

создаваемого двумя зарядами. Согласно принципу суперпозиции

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2, \quad (63.3)$$

где  $\vec{E}$  — напряженность системы зарядов в точке A,  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  — напряженности полей в данной точке, создаваемые соответственно зарядами  $q_1$  и  $q_2$ . Значение вектора  $\vec{E}$  определяется с помощью теоремы косинусов

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cdot \cos \alpha}, \quad (63.4)$$

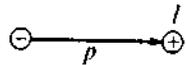


Рис. 97

где  $\alpha$  — угол между векторами  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  (рис. 96).

**Диполь.** Электрическим диполем называют систему из двух зарядов, равных по модулю, разноименных по знаку и находящихся на расстоянии  $l$  друг от друга. Отрезок  $l$ , соединяющий заряды, называют осью диполя и он значительно меньше расстояния до рассматриваемых точек поля (рис. 97).

Вектор, направленный по оси диполя от отрицательного заряда к положительному, и по величине равный оси диполя, называют *плечом диполя*  $\vec{l}$ .

Вектор, совпадающий по направлению с плечом диполя и равный произведению заряда  $|q|$  на плечо  $\vec{l}$  называют *электрическим моментом диполя*, или *дипольным моментом*

$$\vec{p} = |q| \cdot \vec{l}. \quad (63.5)$$



### Вопросы для самопроверки

1. В чем необходимость использования принципа суперпозиции? 2. Что такое принцип суперпозиции для силы? 3. Каков принцип суперпозиции для электростатического поля? 4. Какие возможности создает принцип суперпозиции для электростатического поля? 5. Чему равна напряженность, которую создают в одной точке электростатические поля двух зарядов? 6. Чему равен модуль этой напряженности? 7. Что называют электрическим диполем? 8. Что называют осью диполя? 9. Что называют плечом диполя? 10. Что называют дипольным моментом?



### § 64. Работа напряженности электростатического поля

**Содержание:** работа при перемещении заряда; потенциальность электростатического поля.

**Работа при перемещении заряда.** Пусть точечный заряд  $q$  находится в стационарном электрическом поле (не меняется со вре-

менем). Силы поля, перемещая заряд, совершают работу. Пусть под действием силы  $\vec{F}$  заряд  $q$  перемещается на расстояние  $\vec{r}$ . Тогда совершенная работа определяется выражением

$$A = (\vec{F} \cdot \vec{r}). \quad (64.1)$$

Из (64.1) получим выражение

$$A = F \cdot s \cdot \cos \alpha, \quad (64.2)$$

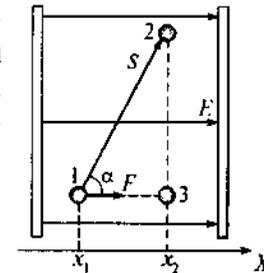


Рис. 98

где  $\alpha$  — угол между векторами силы и перемещения,  $|\vec{r}| = s$  — путь, на который переместился заряд.

Если поле будет однородным ( $E = \text{const}$ ), тогда и сила  $F = qE \cos \alpha$ , действующая на заряд со стороны поля, тоже будет постоянной. В этом случае выражение для работы принимает следующий вид:

$$A = q \cdot E \cdot s \cdot \cos \alpha. \quad (64.3)$$

Теперь вычислим работу, совершаемую в однородном электростатическом поле напряженностью  $E$  при перемещении заряда из точки 1 в точку 2. Заряд в точку 2 может перемещаться по любой траектории. Для простоты рассмотрим две из них: 1—2 и 1—3—2 (рис. 98).

Для обоих случаев вычислим совершенную работу и сравним результаты. Если для траектории 1—2 учтем  $s \cos \alpha = x_2 - x_1$ , то с помощью выражения (64.3) найдем

$$A_{12} = q \cdot E(x_2 - x_1). \quad (64.4)$$

Работу  $A_{132}$  можно рассматривать как сумму работ  $A_{13}$  и  $A_{32}$ :

$$A_{132} = A_{13} + A_{32}$$

и согласно выражению (64.3):

$$A_{13} = qE(x_2 - x_1).$$

Так как в направлении 1—3 направление вектора перемещения и напряженности совпадают, то  $\alpha = 0$  и  $\cos \alpha = 1$ .  $A_{32} = 0$ , т.к. в направлении 3—2 направление вектора перемещения и напряженности взаимно перпендикулярны, т.е.  $\alpha = \pi/2$  и  $\cos \alpha = 0$ .

Таким образом, получим выражение

$$A_{132} = qE(x_2 - x_1). \quad (64.5)$$

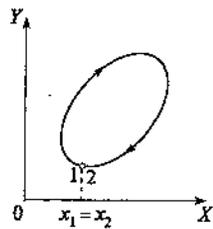


Рис. 99

**Потенциальность электростатического поля.** Сравнивая выражения, и зная, что (64.4) и (64.5),  $A_{12} = A_{132} = qE(x_2 - x_1)$ , приходим к выводу, что работа по перемещению заряда в электростатическом поле зависит не от траектории перемещения, а от начального и конечного положения. Поля с такими свойствами называют потенциальными. Значит, электростатическое поле так же, как и гравитационное, — потенциальное поле, а электростатические силы являются консервативными силами.

Из потенциальности электростатического поля следует, что работа, совершенная по перемещению заряда на замкнутой траектории ( $x_2 = x_1$ ), равна нулю (рис. 99).



#### Вопросы для самопроверки

1. Чему равна работа, совершенная в электростатическом поле при перемещении заряда? 2. Приведите формулу зависимости работы от количества заряда. 3. Зависит ли работа по перемещению заряда от направления перемещения? 4. Чему равна работа, совершенная при перемещении заряда перпендикулярно вектору напряженности? 5. Каким полем является электростатическое поле? 6. Чему равна работа по перемещению заряда на замкнутой траектории в электростатическом поле?



### § 65. Потенциал. Разность потенциалов

**Содержание:** потенциал; разность потенциалов; потенциал системы зарядов; единица потенциала.

**Потенциал.** Естественно, тело в потенциальном поле обладает потенциальной энергией и силы поля за счет этой энергии совершают работу. Например, работа по перемещению заряда в электростатическом поле совершается за счет уменьшения потенциальной энергии заряда, т.е. совершенная работа будет равна разности потенциальной энергии заряда в начальной и конечной точках поля:

$$A_{12} = P_1 - P_2 \quad (65.1)$$

Потенциальная энергия пробного заряда  $q_0$ , расположенная на расстоянии  $r$  в поле заряда  $q$ , определяется следующим выражением:

$$P = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r} \quad (65.2)$$

Для одноименных зарядов  $qq_0 > 0$  и потенциальная энергия их

взаимодействия (отталкивания) положительна, для разноименных зарядов  $qq_0 < 0$  и потенциальная энергия их взаимодействия (притяжения) — отрицательна.

Если из выражения (65.2) определим отношение

$$\frac{P}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \quad (65.3)$$

то оно не зависит от значения заряда  $q_0$ , а является характеристикой точки поля заряда  $q$ , отстоящей от него на расстоянии  $r$ . Эта величина называется потенциалом:

$$\varphi = \frac{P}{q_0} \quad (65.4)$$

**Потенциал** — это энергетическая характеристика поля. Потенциал данной точки электростатического поля есть физическая величина, определяемая потенциальной энергией единичного положительного заряда, помещенного в эту точку поля.

Из формулы (65.3) следует, что потенциал поля, создаваемого обычным зарядом  $q$ , определяется выражением

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \quad (65.5)$$

Этим выражением можно воспользоваться для определения потенциала шара радиусом  $R$ , на котором равномерно распределен заряд  $q$ . Потенциал поля внутри шара будет постоянным:

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

**Разность потенциалов.** Как было отмечено выше, работа, совершаемая силами электростатического поля при перемещении заряда  $q_0$  из точки 1 в точку 2, может быть представлена как  $A_{12} = P_1 - P_2$ . Если воспользоваться выражением (65.4), то получим следующее:

$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (65.6)$$

т.е. совершенная работа равна произведению величины перемещенного заряда на разность потенциалов в начальной и конечной точках.

Разность потенциалов электростатического поля между точками 1 и 2 определяется работой сил поля по перемещению единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2.

Теперь рассмотрим работу, совершаемую силами электростатического поля по перемещению заряда  $q_0$  из произвольной точки за

пределы поля, т.е. в бесконечность (в точку, где потенциал равен нулю). Значит,  $\varphi_2 = 0$  и можем взять  $\varphi_1 = \varphi$ . Тогда на основании (65.6):

$$A_{\infty} = q_0 \varphi.$$

$$\varphi = \frac{A_{\infty}}{q_0}. \quad (65.7)$$

Отсюда

Таким образом, потенциал данной точки поля — это физическая величина, определяемая работой по перемещению единичного положительного заряда при удалении его из данной точки в бесконечность.

**Потенциал системы зарядов.** Если поле создается системой  $n$  точечных зарядов  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , то потенциальная энергия  $P$  заряда  $q_0$ , находящегося в этом поле, равна сумме его потенциальных энергий  $P_i$ , создаваемых каждым из зарядов по отдельности:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = q_0 \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i}. \quad (65.8)$$

На основании (65.4):

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i}. \quad (65.9)$$

Таким образом, если поле создается системой из нескольких зарядов, то потенциал такого поля будет равен алгебраической сумме потенциала поля каждой частицы.

**Единица потенциала.** В СИ в качестве единицы потенциала принят вольт ( $V$ ):

$$[V] = \frac{[P]}{[q]} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = 1 \text{В}.$$

1 В есть потенциал такой точки поля, в которой заряд в 1 Кулон обладает потенциальной энергией 1 Дж. Он назван так в честь итальянского физика А. Вольта. Разность потенциалов (напряжение) также измеряется в вольтах.



#### Вопросы для самопроверки

1. Какую энергию будет иметь заряд в электростатическом поле? 2. За счет чего выполняется работа по перемещению заряда в электростатическом поле? 3. Чему равна работа, совершенная по перемещению заряда в электростатическом поле? 4. Чему равна потенциальная энергия пробного заряда, помещенного в электростатическое поле? 5. Чему равен потенциал некоторой точки электростатического поля? 6. Зависит ли потенциал поля от заряда? 7. Является ли потенциал поля векторной величиной? 8. Чему равен потенциал поля точечного заряда? 9. Чему равен потенциал внутри шара с равномерно распределенным

зарядом? 10. Зависит ли от разности потенциалов работа при перемещении зарядов? 11. Чему равна разность потенциалов между двумя точками? 12. Какое еще можно дать определение потенциалу некоторой точки поля? 13. Чему равна потенциальная энергия пробного заряда в поле, созданного системой зарядов? 14. Чему равен потенциал поля, созданного системой зарядов? 15. В чем измеряется единица потенциала в СИ и какой это потенциал?



#### § 66. Связь между напряженностью электростатического поля и разностью потенциалов. Эквипотенциальные поверхности

**Содержание:** связь между напряженностью и разностью потенциалов; эквипотенциальные поверхности.

Мы рассмотрели две характеристики электростатического поля: силовую (напряженность  $\vec{E}$ ) и энергетическую (потенциал  $\varphi$ ). Таким образом, произвольная точка поля характеризуется как напряженностью, так и потенциалом. Значит, между этими величинами должна существовать определенная взаимосвязь. Для этого найдем работу, совершаемую силами поля ( $E_x$ ) при перемещении заряда вдоль оси  $x$  на расстояние  $\Delta x$  (рис. 100). На основании (64.4):

$$A = q E_x \cdot \Delta x, \quad (66.1)$$

Если теперь эту работу выразить через разность потенциалов,

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = -q(\varphi_2 - \varphi_1) = -q\Delta\varphi. \quad (66.2)$$

Приравняв эти два выражения для работы, найдем модуль вектора напряженности  $E_x \cdot \Delta x = -\Delta\varphi$  или

$$E_x = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x}. \quad (66.3)$$

Точно так же, перемещая заряд вдоль оси  $y$  и  $z$ , можем получить

$$E_y = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta y}, \quad E_z = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta z}. \quad (66.4)$$

Таким образом, если известна напряженность каждой точки, можно найти разность потенциалов между любыми точками.

Как видно из (66.3) и (66.4), напряженность некоторой точки поля равна скорости изменения потенциала, взятого с отрицательным знаком. Отрицательный знак показывает, что вектор напряженности  $\vec{E}$  поля направлен в сторону убывания потенциала.

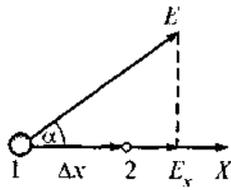


Рис. 100

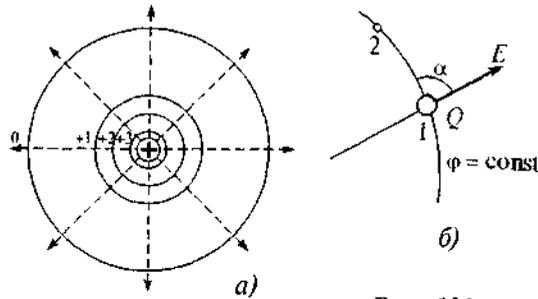


Рис. 101

Для случая однородного поля (например поля плоского конденсатора) напряженность определяется следующим выражением:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}, \quad (66.5)$$

где  $d$  — расстояние между пластинами конденсатора,  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  — разность потенциалов.

**Эквипотенциальные поверхности.** Электрическое поле графически можно выразить не только линиями напряженности, но и через поверхности равных потенциалов. Эквипотенциальными поверхностями называют поверхности, во всех точках которых потенциал  $\varphi$  имеет одно и то же значение. Эти поверхности на рисунке изображаются в виде эквипотенциальных поверхностей. На рисунке 101 а показаны эквипотенциальные поверхности поля точечного положительного заряда.

Эквипотенциальных поверхностей вокруг заряда можно провести бесчисленное множество. Однако их обычно проводят так, чтобы разности потенциалов между любыми двумя соседними эквипотенциальными поверхностями были одинаковы (например 1 В). Тогда густота эквипотенциальных поверхностей наглядно характеризует напряженность поля в разных точках.

Теперь рассмотрим работу, которую совершают силы поля при перемещении заряда  $q$  по эквипотенциальной поверхности из точки 1 в точку 2, ее можно вычислить следующим образом:

$$A = q (\varphi_1 - \varphi_2).$$

На эквипотенциальной поверхности  $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$ , и значит,

$$A = 0. \quad (66.6)$$

Значит, работа при перемещении заряда по эквипотенциальной поверхности равна нулю.

С другой стороны, совершенную работу можно написать и в таком виде:  $A = F \cdot x \cdot \cos \alpha = q \cdot E \cdot x \cdot \cos \alpha = q \cdot E_x \cdot x$  (рис. 101 б). Здесь

$E_x = E \cdot \cos \alpha$  — проекция напряженности на направление перемещения,  $x$  — величина перемещения, на основании (66.6) должно быть  $A = q \cdot E_x \cdot x = 0$ .  $q$  и  $x$  не могут быть равны нулю, значит единственно возможно, что  $E_x = E \cdot \cos \alpha = 0$ ,  $\cos \alpha = 0$ ,  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ . Другими словами, вектор напряженности  $\vec{E}$  и направление перемещения взаимно перпендикулярны. Следовательно, вектор напряженности поля в каждой точке эквипотенциальной поверхности и перпендикуляром направлен в сторону убывания потенциала.



### Вопросы для самопроверки

1. На основании чего считается, что существует взаимосвязь между напряженностью поля и разностью потенциалов? 2. Расскажите о взаимосвязи между напряженностью поля и разностью потенциалов. 3. В какую сторону направлен вектор напряженности? 4. Существует ли связь между напряженностью и разностью потенциала в однородном поле? 5. Какие поверхности называются эквипотенциальными? 6. Нарисуйте эквипотенциальные поверхности. 7. Может ли эквипотенциальная поверхность показать, как меняется разность потенциалов? 8. Чему равна работа при перемещении заряда по эквипотенциальной поверхности? Докажите свой ответ.



## § 67. Диэлектрики. Поляризация диэлектриков

**Содержание:** диэлектрики; поляризация диэлектриков; поляризованность; диэлектрическая проницаемость.

**Диэлектрики.** Как было сказано выше, диэлектриками являются вещества, у которых нет свободных электронов, однако они, как и всякое вещество, состоят из атомов и молекул. Если заметить положительные заряды ядер молекулы через суммарный заряд  $+q_1$ , находящийся в центре «тяжести» положительного заряда, а заряд всех электронов суммарным отрицательным зарядом  $-q_1$ , находящимся в центре «тяжести» отрицательных зарядов, то молекулу можно рассматривать как электрический диполь с электрическим моментом  $\vec{P} = q \cdot \vec{l}$  (рис. 102).

По своему строению диэлектрики делятся на три группы. *Первую группу* диэлектриков составляют вещества, молекулы которых имеют симметричное строение, т.е. центры «тяжести» положительного и отрицательного зарядов совпадают при отсутствии внешнего поля. Следовательно, у таких диэлектриков дипольный момент молекулы будет равен нулю и они называются неполярными молекулами. К неполярным диэлектрикам относятся бензол, парафин, полиэтилен, водород, кислород, азот и др.

*Вторую группу* диэлектриков составляют вещества, молекулы которых имеют ассиметричное строение, т.е. центры «тяжести» поло-

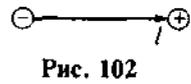
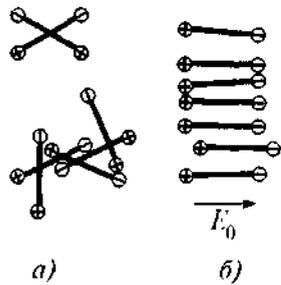


Рис. 102



а)

б)

Рис. 104

жителейных и отрицательных зарядов не совпадают. Молекулы таких диэлектриков даже в отсутствии внешнего поля обладают дипольным моментом и называются полярными. При отсутствии внешнего поля дипольные моменты полярных молекул вследствие теплового движения ориентированы в пространстве хаотично и их результирующий момент равен нулю. К диэлектрикам второй группы относятся фенол, нитробензол, вода, аммиак, угарный газ и др.

Третью группу диэлектриков составляют вещества, молекулы которых имеют ионное строение. Ионные кристаллы представляют собой пространственные решетки с правильным чередованием ионов разных знаков. В этих кристаллах нельзя выделить отдельные молекулы, а рассматривать их можно как систему двух вдвинутых одна в другую ионных подрешеток. К таким диэлектрикам относятся поваренная соль, кальция хлорид, цезия хлорид и др.

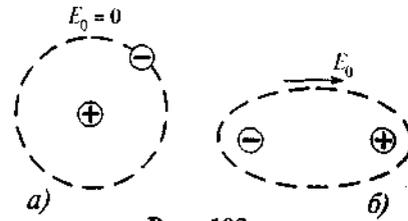
**Поляризация.** Если поместить диэлектрик во внешнее электрическое поле, то у него появится отличный от нуля электрический момент. Другими словами, диэлектрик поляризуется. *Поляризацией* диэлектрика называется явление ориентации диполей или появление под воздействием электрического поля ориентированных по полю диполей.

В соответствии с тремя видами диэлектриков поляризация тоже делится на три вида.

1. **Электронная поляризация.** Если неполярная молекула помещается в электрическое поле (рис. 103 а), то под действием поля происходит деформация электронных орбит, и в атомах возникают индуцированные дипольные моменты (рис. 103 б).

2. **Дипольная (ориентационная) поляризация.** Диполи полярных молекул, совершающих беспорядочное движение (рис. 104 а), располагаются упорядоченно по полю (рис. 104 б).

3. **Ионная поляризация.** Под действием внешнего поля происходит смещение подрешетки положительных ионов вдоль поля, а отрицательных — против поля.



а)

б)

Рис. 103

**Поляризованность.** Значит, при помещении диэлектрика во внешнее электростатическое поле он поляризуется, т.е. приобретает отличный от нуля дипольный момент. Дипольный момент диэлектрика определяется следующим образом:

$$\vec{P}_V = \sum_{i=1}^n \vec{P}_i = \vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \dots + \vec{P}_n, \quad (67.1)$$

где  $\vec{P}_i$  — дипольный момент одной молекулы,  $n$  — число молекул в диэлектрике.

Значит, дипольный момент молекулы будет равен векторной сумме дипольных моментов молекул, имеющих в диэлектрике.

Для количественного описания степени поляризации диэлектрика пользуются векторной величиной, — поляризованностью. Поляризованностью называют величину, определяемую дипольным моментом единицы объема диэлектрика:

$$\vec{P} = \frac{\vec{P}}{V} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{P}_i}{V}, \quad (67.2)$$

где  $V$  — объем диэлектрика.

Для изотропных диэлектриков поляризованность линейно зависит от напряженности поля:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E}, \quad (67.3)$$

где  $\chi$  — диэлектрическая восприимчивость вещества и зависит от строения и температуры молекулы. Она является безразмерной величиной и всегда больше нуля:

$$\chi > 0$$

Значит, поляризованность  $\vec{P}$  всегда направлена по направлению напряженности  $\vec{E}$  внешнего электрического поля.

**Диэлектрическая проницаемость.** В результате поляризации на поверхности диэлектрика появляются нескомпенсированные соседними диполями заряды (рис. 105). На одной поверхности диэлектрика будет избыток положительного заряда, а на другой — избыток отрицательного заряда. Такие заряды называют связанными зарядами. Связанные заряды принадлежат молекулам диэлектрика и их нельзя удалить с его поверхности. Появление связанных зарядов приводит к возникновению дополнительного электрического поля  $E$ , которое направлено против внешнего поля  $E_0$ , поляризующего диэлектрик (рис. 106). Значит, результирующая напряженность  $\vec{E}$  зависит от электрических свойств

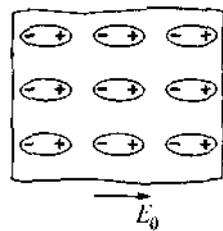


Рис. 105

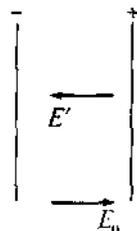


Рис. 106

среды и пропорциональна напряженности  $\vec{E}_0$  внешнего поля, приложенного к диэлектрику:

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\epsilon}, \quad (67.4)$$

где  $\epsilon = \frac{\vec{E}_0}{E}$  показывает во

сколько раз диэлектрик ослабляет напряженность электрического поля в вакууме;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость. Она безразмерная величина и характеризует свойство диэлектриков поляризоваться в электрическом поле. Она следующим образом связана с диэлектрической восприимчивостью:

$$\epsilon = 1 + \chi. \quad (67.5)$$

Ниже приводятся диэлектрические проницаемости некоторых веществ.

Таблица 6

Вещество	$\epsilon$	Вещество	$\epsilon$
Чистая вода	81	Парафин	2,2
Воздух	1,0006	Слюда	6–8
Кварц	4,5	Стекло	6–10
Радиотехнический фарфор	80 гача	Эбонит	3
Трансформаторное масло	2,2	Янтарь	2,8



### Вопросы для самопроверки

1. Что называют диэлектриком? 2. Можно ли рассматривать молекулу диэлектрика в качестве электрического диполя? 3. Чему равен электрический момент такого диполя? 4. Какие диэлектрики относятся к первой группе? Приведите примеры. 5. Какие диэлектрики относятся к второй группе? Приведите примеры. 6. Какие диэлектрики относятся к третьей группе? Какие это диэлектрики? Приведите примеры. 7. Что называют поляризацией диэлектриков? 8. Сколько существует видов поляризации диэлектриков? 9. Как происходит электронная поляризация? 10. Как происходит дипольная поляризация? 11. Как происходит ионная поляризация? 12. С какой целью вводится понятие поляризации? 14. Что называют поляризацией? 15. Зависит ли поляризация от напряженности внешнего магнитного поля? А направление поляризации? 16. Какой величиной является диэлектрическая восприим-

чивость? 17. Какие заряды называют связанными? 18. Можно ли удалить с поверхности вещества связанные заряды? 19. Совпадает ли направление напряженности поля внутри диэлектрика с напряженностью внешнего поля? Как они связаны? 20. Что такое диэлектрическая проницаемость и в чем заключается ее физический смысл? 21. Как связаны между собой диэлектрическая проницаемость и диэлектрическая восприимчивость?



### § 68. Проводники в электрическом поле

**Содержание:** свободные заряды в проводниках; проводник в электростатическом поле; электростатическая защита.

**Свободные заряды в проводниках.** Как и все вещества проводники тоже состоят из атомов. В состав атома входят положительно заряженные протоны и отрицательно заряженные электроны. Атом в нормальном состоянии электронейтрален, так как число протонов в ядре атома равно числу электронов, вращающихся вокруг атома в электронной «оболочке». Электроны в атоме удерживаются электрической силой притяжения ядра. Но металлы имеют такое свойство, что в результате внешнего воздействия внешний электрон легко покидает свой атом и пока не будет захвачен другим атомом, может свободно перемещаться. Электроны, утратившие связь со «своим» атомом, называют свободными. Их движение беспорядочное и с повышением температуры скорость движения свободных электронов возрастает. В металлах концентрация свободных электронов бывает порядка  $10^{28} \text{ м}^{-3}$ . Вместе с этим в направлении, противоположном направлению движения электрона, движется и атом, которого покинул электрон, т.е. положительный ион.

**Проводники в электростатическом поле.** Если во внешнее электростатическое поле внести нейтральный проводник, то свободные заряды (электроны и ионы) будут перемещаться: положительные — по полю, отрицательные — против поля (рис. 107).

В результате на поверхности проводника  $AB$  будет скапливаться избыток отрицательного заряда, на поверхности  $CD$  — избыток положительного заряда. Эти заряды называют *индуцированными*. Процесс будет происходить до тех пор, пока напряженность поля внутри проводника не станет равной нулю, а линии напряженности вне проводника — перпендикулярными его поверхности (рис. 108). Это показывает, что во всех точках внутри проводника потенциал постоянный ( $\phi = \text{const}$ ), т.е. поверхность проводника в поле является эквипотенциальной поверхностью.

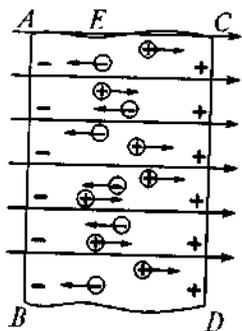


Рис. 107

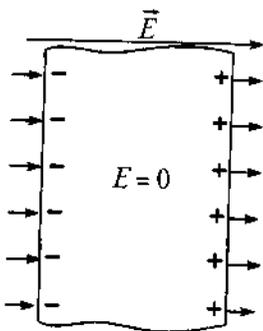


Рис. 108

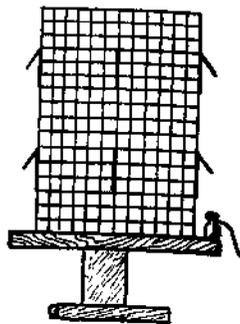


Рис. 109

Таким образом, нейтральный проводник, внесенный в электростатическое поле, разрывает часть линий напряженности. Они заканчиваются на отрицательных индуцированных зарядах и вновь начинаются на положительных. Индуцированные заряды распределяются на внешней поверхности проводника. Электростатической индукцией называют перераспределение поверхностных зарядов на проводнике во внешнем электростатическом поле.

Из рисунка 108 следует, что индуцированные заряды появляются на проводнике вследствие смещения их под действием поля, т. е.  $\sigma$  называют поверхностную плотность смещенных зарядов. Вблизи проводника электрическое смещение  $\vec{D}$  численно равно поверхностной плотности смещенных зарядов  $\sigma$ . Поэтому вектор  $\vec{D}$  называется вектором электрического смещения.

**Электростатическая защита.** Если проводнику сообщить какой-то заряд  $q$ , все заряды распределяются на поверхности проводника с плотностью заряда  $\sigma$ , т. е. внутри проводника не будет лишних зарядов. (Поверхностная плотность зарядов определяется

отношением  $\sigma = \frac{q}{S}$ , показывает количество зарядов, приходящихся на единицу поверхности проводника и измеряется в 1 Кл/м<sup>2</sup>.) Заряд в полых проводниках, так же как в целых, распределяется по поверхности.

Это утверждение было точно продемонстрировано следующим опытом М. Фарадея (рис. 109). Если изготовить из металлической сетки цилиндр (клетка Фарадея), укрепить его на изолированной подставке и на внешнюю и внутреннюю поверхности наклеить легкие листочки (они выполняют роль электроскопа) и сообщить цилиндру заряд от электростатической машины, то листочки на внешней поверхности цилиндра будут отклоняться. Это показывает, что внутри клетки нет электрического поля. Таким образом, проводящая поверхность надежно защищает зону,

которую она охватывает, от действия внешнего электрического поля.

Таковыми поверхностями пользуются в качестве электростатической защиты.



### Вопросы для самопроверки

1. Какие электроны называют свободными? 2. Каким образом в металлах появляются свободные электроны? 3. Какова концентрация свободных электронов в металлических проводниках? 4. Как себя ведет положительный ион, которого покинул электрон? 5. Какое явление произойдет, если проводник внести в электростатическое поле? 6. Какие заряды называют индуцированными зарядами? 7. До каких пор продолжается процесс индуцирования? 8. Когда потенциал внутри проводника будет постоянным? 9. Как изменяются линии напряженности внутри проводника? 10. Какое явление носит название электростатической индукции? 11. Откуда появляются индуцированные заряды? 12. Какая существует взаимосвязь между электрическим смещением и поверхностной плотностью смещенных зарядов? 13. Какая величина называется поверхностной плотностью зарядов? 14. Как распределяется заряд в проводнике? 15. Что вы знаете о клетке Фарадея? 16. Какие свойства проводящих поверхностей дают возможность использовать их в качестве электростатической защиты?



## § 69. Электрическая емкость. Конденсаторы. Соединение конденсаторов

**Содержание:** электрическая емкость уединенного проводника; емкость шарообразного уединенного проводника; единица электрической емкости; конденсаторы; электрическая емкость конденсаторов; соединение конденсаторов.

**Электрическая емкость уединенного проводника.** Рассмотрим уединенный проводник, т. е. проводник, который удален от других проводников, тел и зарядов. От чего зависит электрическая емкость такого проводника? Естественно, электрическая емкость пропорциональна заряду в нем, т. е. чем больше будет в нем заряда, тем больше будет электроемкость проводника, т. е. его электроемкость. Величина, определяемая следующим выражением

$$C = \frac{q}{\phi}, \quad (69.1)$$

называется *электроемкостью уединенного проводника*.

Электроемкость уединенного проводника определяется зарядом, сообщенным проводнику, который повышает его потенциал на единицу.

Таким образом, электроемкость проводника или системы проводников есть физическая величина, характеризующая свойство этого проводника, или системы проводников накапливать в себя электрические заряды.

В общем случае емкость проводника зависит от среды, в которой он находится, и от окружающих его тел. Вместе с этим, как например емкость бочки не зависит от количества налитой в нее воды и от ее плотности, так же емкость не зависит ни от заряда проводника, ни от его потенциала.

**Единица электрической емкости.** В СИ за единицу электроемкости принят 1 фарад (Ф). Она названа так в честь английского физика М. Фарадея. 1 Ф — емкость такого уединенного проводника, потенциал которого изменяется на 1 В при сообщении ему заряда 1 Кл. Емкость 1 Ф — очень большая величина. Даже емкость такого проводника, как Земля, составляет всего  $7 \cdot 10^{-4}$  Ф. Поэтому на практике часто используются дольные единицы: микрофарад (1 мкФ) =  $10^{-6}$  Ф, нанофарад (нФ) =  $10^{-9}$  Ф, пикофарад (пФ) =  $10^{-12}$  Ф.

**Емкость уединенного шарообразного проводника.** Нам известно, что потенциал уединенного шара радиуса  $R$  равен  $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R}$ . Если теперь значение  $\varphi$  подставим в (69.1), то получим следующее:

$$C = 4\pi\epsilon_0 R, \quad (69.2)$$

где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная.

Если шар находится в однородной среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , его емкость определяется следующим образом:

$$C = 4\pi\epsilon_0 \epsilon R. \quad (69.3)$$

Если из выражения (69.3) найдем  $\epsilon_0$ :

$$\epsilon_0 = \frac{C}{4\pi\epsilon R}$$

и при помощи этого выражения найдем единицу  $\epsilon_0$  в СИ, то получим следующее:

$$[\epsilon_0] = \frac{[C]}{[R]} = 1 \frac{\text{Ф}}{\text{м}}.$$

Значит, единица  $\epsilon_0$ , которой мы пользовались ранее, была получена из формулы для емкости.

**Конденсаторы.** На практике большое значение имеет накопление зарядов и при необходимости использование их. Для

этих целей применяется устройство, называемое конденсатором. Важное значение имеет уменьшение размеров конденсаторов и увеличения их емкости. Поэтому конденсатор состоит из двух проводников (обкладок), разделенных диэлектриком. Чтобы на емкость конденсатора не оказывали влияния окружающие тела, проводникам придают такую форму, чтобы поле, создаваемое накапливаемыми зарядами, было сосредоточено в узком зазоре между обкладками конденсатора. Этому условию удовлетворяют: 1) две плоские пластины; 2) два коаксиальных цилиндра; 3) две концентрические сферы. Поэтому в зависимости от формы обкладок конденсаторы делятся на плоские, цилиндрические и сферические. Так как поле сосредоточено внутри конденсатора, то линии напряженности начинаются на одной обкладке и заканчиваются на другой. Поэтому свободные заряды, возникающие на разных обкладках, являются равными по модулю и разноименными по знаку.

Емкость конденсатора определяется отношением заряда  $q$ , накопленного в конденсаторе, к разности потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$  между обкладками:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}. \quad (69.4)$$

Конденсаторы характеризуются напряжением пробоя. Если разность потенциалов между обкладками станет больше этого значения, происходит пробой — электрический разряд проходит через слой диэлектрика в конденсаторе.

**Емкость конденсаторов.** 1. Емкость плоского конденсатора (рис. 110 а):

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (69.5)$$

где  $S$  — площадь обкладок конденсатора;  $d$  — расстояние между обкладками;  $\epsilon$  — проницаемость диэлектрика между обкладками.

2. Емкость цилиндрического конденсатора (рис. 110 б):

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 \epsilon L}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}, \quad (69.5)$$

где  $R$  и  $r$  — радиусы вставленных один в другой цилиндров;  $L$  — высота цилиндра.

3) Емкость сферического конденсатора (рис. 110 в):

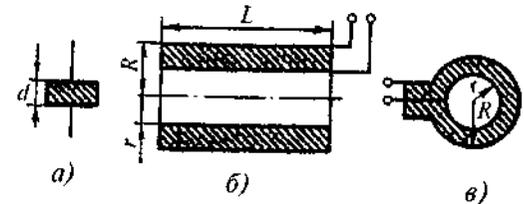


Рис. 110

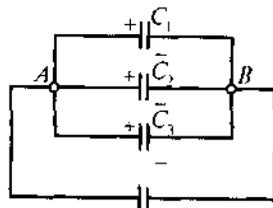


Рис. 111

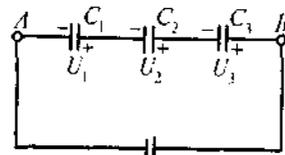


Рис. 112

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon r R}{R-r}, \quad (69.7)$$

где  $r$  и  $R$  — радиусы сфер.

Из формул (69.6) — (69.7) вытекает, что емкость конденсатора прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости диэлектрика, заполняющего пространство между обкладками конденсатора.

**Параллельное соединение конденсаторов.** Чтобы увеличить емкость или получить необходимое значение емкости, конденсаторы соединяют в батареи. Их можно соединить двумя способами: параллельно и последовательно. Для простоты рассмотрим случай соединения трех конденсаторов. Но выводы будут уместны для любого количества конденсаторов.

При параллельном соединении соединяются одноименно заряженные обкладки (рис. 111). При этом полный заряд батареи будет равен:

$$q = q_1 + q_2 + q_3. \text{ Но } q_1 = U_{AB} \cdot C_1; \quad q_2 = U_{AB} \cdot C_2; \quad q_3 = U_{AB} \cdot C_3; \\ q_{\text{полн}} = U_{AB} (C_1 + C_2 + C_3). \text{ Отсюда полная емкость батареи}$$

$$C_{\text{полн}} = \frac{q_{\text{полн}}}{U_{AB}} = C_1 + C_2 + C_3.$$

Значит, при параллельном соединении емкость батареи будет равна сумме емкостей всех входящих в батарею конденсаторов:

$$C_{\text{полн}} = \sum_{i=1}^n C_i, \quad (69.8)$$

где  $n$  — число конденсаторов в батарее: Если емкости конденсаторов будут одинаковыми, то получим:

$$C_{\text{полн}} = n \cdot C. \quad (69.9)$$

**Последовательное соединение конденсаторов.** При последовательном соединении конденсаторов друг с другом соединяются разноименные обкладки (рис. 112). При этом заряд батареи будет равен  $q_{\text{полн}} = q_1 = q_2 = q_3$ .

Напряжение между точками  $A$  и  $B$ :

$$U_{AB} = U_1 + U_2 + U_3 = \frac{q_1}{C_1} + \frac{q_2}{C_2} + \frac{q_3}{C_3} = q_{\text{полн}} \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right).$$

Если учесть, что  $C_{\text{полн}} = \frac{q_{\text{полн}}}{U_{AB}}$ , получим:

$$\frac{1}{C_{\text{полн}}} = \frac{U_{AB}}{q_{\text{полн}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.$$

В общем случае:

$$\frac{1}{C_{\text{полн}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}. \quad (69.10)$$

Если емкости конденсаторов будут одинаковыми,

$$C_{\text{полн}} = \frac{C}{n}. \quad (69.11)$$



#### Вопросы для самопроверки

1. Какой проводник называют уединенным?
2. Какую величину называют емкостью проводника?
3. Что характеризует его емкость?
4. Зависит ли электрическая емкость от заряда, переданного ей, и потенциала?
5. Зависит ли емкость проводника от среды, в которой она находится?
6. Чему равна электрическая емкость шарообразного проводника?
7. Чему равна единица емкости в СИ?
8. Какие еще единицы емкости вы знаете?
9. В чем необходимость использования других единиц емкости?
10. В чем заключается роль емкости?
11. Каким должен быть конденсатор в соответствии со своим назначением?
12. На какие виды делятся конденсаторы?
13. Равны ли величины зарядов на обкладках конденсаторов?
14. Как определяется емкость конденсатора?
15. Какое напряжение называется напряжением «пробоя» конденсатора?
16. Что такое электрическая емкость конденсатора?
17. Что такое электрическая емкость цилиндрического конденсатора?
18. Что такое электрическая емкость сферического конденсатора?
19. Зависят ли емкости конденсаторов от природы диэлектриков?
20. Для чего нужны батареи конденсаторов?
21. Какое соединение называют параллельным соединением конденсаторов?
22. Чему в этом случае будет равна полная емкость?
23. Каким в этом случае будет потенциал на обкладках конденсатора?
24. Каким в этом случае будет полный заряд конденсатора?
25. Какое соединение называют последовательным соединением конденсаторов?
26. Как в этом случае находится полная емкость?
27. Каким в этом случае будет полный заряд конденсатора?
28. Каким в этом случае будет напряжение?

## § 70. Энергия заряженного конденсатора

**Содержание:** энергия заряженного уединенного проводника; энергия заряженного конденсатора.

**Энергия заряженного уединенного проводника.** Сначала рассмотрим энергию заряженного уединенного проводника. Заряд  $q$  необходимо перенести из бесконечности к поверхности проводника. Для этого надо совершить работу против силы поля. При этом потенциал проводника возрастает с 0 до  $\varphi$ . Значит, среднее значение потенциала будет  $\frac{\varphi}{2}$ .

Таким образом, работа, совершаемая при перемещении заряда  $q$  из бесконечности, или полученная при этом потенциальная энергия заряженного уединенного проводника определяется следующим образом:

$$W = A = \frac{q\varphi}{2} = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{q^2}{2C}, \quad (70.1)$$

где учитывается, что  $q = C\varphi$ ,  $C$  — емкость проводника.

**Энергия заряженного конденсатора.** Как всякий заряженный проводник конденсатор тоже обладает энергией, определяемой формулой (70.1):

$$W = \frac{C(\Delta\varphi)^2}{2} = \frac{q \cdot \Delta\varphi}{2} = \frac{q^2}{2C}, \quad (70.2)$$

где  $q$  — заряд конденсатора,  $C$  — его емкость,  $\Delta\varphi$  — разность потенциалов между обкладками.



### Вопросы для самопроверки

1. Совершается ли работа при переносе заряда из бесконечности в данную точку поля? 2. Против чего в этом случае совершается работа? 3. Как измеряется потенциал проводника при переносе заряда из бесконечности? 4. Чему равна работа, совершенная при переносе заряда из бесконечности? 5. Чему будет равна потенциальная энергия, полученная уединенным проводником при переносе заряда из бесконечности? 6. Чему равна энергия заряженного конденсатора?



## § 71. Энергия электростатического поля

**Содержание:** энергия электростатического поля; объемная плотность энергии.

**Энергия электростатического поля.** Энергия заряженного конденсатора выражается через величину, характеризующую электростатическое поле между обкладками конденсатора. Поэтому

энергию электростатического поля находят как энергию плоского конденсатора  $\left( C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \Delta\varphi = Ed \right)$ :

$$W = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} \cdot \frac{E^2 d^2}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} \cdot S \cdot d = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} \cdot V, \quad (71.1)$$

где  $V = S \cdot d$  — объем конденсатора. Из формулы (71.1) видно, что энергия конденсатора выражается через величину, характеризующую электростатическое поле — напряженность  $E$ .

**Объемная плотность энергии.** Чтобы определить объемную плотность энергии, надо разделить энергию электростатического поля на объем:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} = \frac{ED}{2} = \frac{D^2}{2\epsilon_0 \epsilon}, \quad (71.2)$$

где  $D$  — вектор электрического смещения.



### Вопросы для самопроверки

1. Где сосредоточена энергия конденсатора? 2. Равна ли энергия конденсатора энергии электростатического поля? 3. Чему равна энергия электростатического поля? 4. Как определяется объемная плотность энергии? 5. Как определяется объемная плотность энергии электростатического поля?



### Примеры решения задач

**Задача 1.** Даны два шарика, каждый массой  $10^{-3}$  кг. По сколько зарядов необходимо сообщить каждому шару, чтобы взаимная сила притяжения была равна взаимной силе отталкивания? Шары рассматривать как материальные точки.

**Дано:**

$$m = m_1 = m_2 = 10^{-3} \text{ кг};$$

$$F_k = F.$$

$$q = q_1 = q_2 = ?$$

**Решение.** Кулоновская сила между двумя одноименно заряженными шарами определяется следующим образом:

$$F_k = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = k \frac{q^2}{r^2}.$$

Сила притяжения между материальными точками:

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

Из условия задачи  $F_k = F$ , отсюда получаем  $k \frac{q^2}{r^2} = G \frac{m^2}{r^2}$ .

Из этого равенства найдем  $q$ :  $q = m\sqrt{\frac{G}{k}}$ .

Учитывая значение массы и что  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Ф/м}$ ,  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}$ , находим:

$$q = 10^{-3} \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11}}{9 \cdot 10^9}} \text{ Кл} = 86,7 \cdot 10^{-15} \text{ Кл}.$$

Ответ:  $q = 86,7 \cdot 10^{-15} \text{ Кл}$ .

**Задача 2.** Между обкладками плоского конденсатора имеется стеклянная пластинка. Конденсатор заряжается до разности потенциалов  $U_1 = 100 \text{ В}$ . Чему будет равна разность потенциалов в конденсаторе, если удалить пластинку из конденсатора?

**Дано:**

$$U_1 = 100 \text{ В};$$

$$\epsilon = 7.$$

$$U_2 = ?$$

**Решение.** Из выражения емкости конденсатора  $C = \frac{q}{U}$  находим разность потенциалов:

$$U = \frac{q}{C}.$$

Емкость конденсатора (когда между обкладками была стеклянная пластинка)  $C_1 = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$ , и когда удалим пластинку ( $\epsilon = 1$ )  $C_2 = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ . Отсюда

$$U_1 = \frac{qd}{\epsilon \epsilon_0 S}, U_2 = \frac{qd}{\epsilon_0 S}.$$

$U_1$  выразим через  $U_2$ :

$$U_1 = \frac{U_2}{\epsilon} \text{ или } U_2 = \epsilon \cdot U_1.$$

При помощи данных находим:

$$U_2 = 7 \cdot 100 \text{ В} = 700 \text{ В}.$$

Ответ.  $U_2 = 700 \text{ В}$ .

**Задача 3.** Чему равна энергия электростатического поля металлического шара, если диаметр шара равен 20 см, а заряд шара 100 нКл?

**Дано:**

$$d = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м};$$

$$q = 100 \text{ нКл} = 10^{-7} \text{ Кл}.$$

$$W = ?$$

**Решение.** Энергия электростатического поля заряженного металлического шара определяется следующим образом:

$$W = \frac{q^2}{2C},$$

где  $C$  — электрическая емкость шара радиусом  $R = \frac{d}{2}$ . Из  $C = 4\pi\epsilon_0 \epsilon R = 2\pi\epsilon_0 \epsilon d$ :

$$W = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon d}.$$

Используя данные и учитывая, что  $\epsilon = 1$ ,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ :

$$W = \frac{(10^{-7})^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,2} \text{ Дж} = 4,50 \cdot 10^{-4} \text{ Дж} = 450 \text{ мкДж}.$$

Ответ:  $W = 450 \text{ мкДж}$ .



### Задачи для самостоятельного решения

- Во сколько раз сила гравитационного притяжения двух электронов меньше силы их электрического отталкивания? ( $2,4 \cdot 10^{-45}$ )
- Два точечных заряда 2 мкКл и  $-3$  мкКл расположены на расстоянии 5 см друг от друга. Найти напряженность поля в точке удаленного от положительного заряда на 3 см и от отрицательного заряда на 4 см. ( $E = 9,9 \cdot 10^6 \text{ Н/Кл}$ )
- Два точечных заряда:  $q_1 = 2q$  и  $q_2 = -q$  расположены на расстоянии  $d$  друг от друга. В какой точке поля, проходящей через заряды, напряженность равна нулю? ( $2,41d$ )
- Металлический шар диаметром 2 см заряжен отрицательно до потенциала 150 В. Сколько электронов имеется на поверхности шара? ( $1,04 \cdot 10^9$ )
- Четыре одинаковых ртутных шарика, заряженные до потенциала 10 В, слились в одну большую каплю. Найти потенциал большей капли. ( $\varphi \approx 25 \text{ В}$ )
- Найти емкость плоского слюдяного конденсатора, если площадь обкладок равна 100 см<sup>2</sup>, расстояние между ними 0,1 мм ( $C = 6,2 \text{ нФ}$ ).
- Сила притяжения между пластинами конденсатора  $F = 50 \text{ мН}$ . Площадь каждой пластины 200 см<sup>2</sup>. Найти плотность энергии поля конденсатора. ( $w = 2,5 \text{ Дж/м}^3$ )
- Конденсатору емкостью 10 пФ сообщили заряд 1 пКл. Какова энергия заряженного конденсатора? ( $W = 0,05 \text{ мкДж}$ ).

### Тестовые вопросы

1. Найдите формулу закона Кулона.

Е. А.  $F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$ .

В.  $F = qE$ .

С.  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ .

Д.  $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$ .

Е. Правильные ответы А и Д.

2. Какая из приведенных формул выражает напряженность электрического поля точечного заряда?

- A.  $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ .      B.  $E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}$ .  
 C.  $E = \frac{F}{q}$ .      D.  $E = \frac{d}{2\epsilon d}$ .  
 E.  $E = E_1 + E_2 + E_3 \dots$

3. ...данной точки электростатического поля есть физическая величина, определяемая потенциальной энергией единичного положительного заряда, помещенного в эту точку поля.

- A. Напряженность поля.      B. Потенциальная энергия.  
 C. Кинетическая энергия.      D. Взаимодействие.  
 E. Потенциал.

4. Скольким джоулям равна работа по перемещению в электрическом поле единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2? Разность потенциалов между точками 10 В.

- A. 0.      B. 5.      C. 8,7.      D. 10.      E. 17.

5. Какая из приведенных формул выражает полную емкость параллельно соединенных конденсаторов?

- A.  $C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$ .      B.  $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_m}$ .  
 C.  $C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{\alpha}$ .      D.  $C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}$ .  
 E. Правильного ответа нет.

### Основные выводы

**Закон сохранения электрического заряда:** в любой замкнутой системе, независимо от того, какие процессы происходят внутри этой системы, алгебраическая сумма зарядов всех частиц остается неизменной:  $\sum_{i=1}^n q_i = \text{const}$ . Единица заряда в СИ — 1 Кл.

**Закон Кулона:** Сила взаимодействия  $\vec{F}$  между двумя неподвижными точечными зарядами  $q_1$  и  $q_2$  в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$  между ними:

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

Электрическая постоянная:  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ .

Поле вокруг неподвижного заряда называется *электростатическим*.

*Напряженность электростатического поля* в данной точке есть физическая величина, определяемая силой, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в эту точку поля:

$$\vec{E} = \vec{F} / q. \text{ Единица напряженности в СИ — } 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

Принцип суперпозиции электростатического поля

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$$

Электростатическое поле — потенциальное поле.

Потенциал данной точки электростатического поля есть физическая величина, определяемая потенциальной энергией единичного положительного заряда, помещенного в эту точку поля.

Единица потенциала в СИ — 1 В.

*Поляризацией* диэлектрика называется явление ориентации диполей или появление под воздействием электрического поля ориентированных по полю диполей.

Электрическая емкость уединенного проводника определяется выражением  $C = q/\varphi$ . Единица электрической емкости в СИ — 1 Ф.

*Конденсатором* называется устройство, способное накапливать электрические заряды и при необходимости их использовать.

Конденсаторы: Полная емкость при параллельном соединении  $C_{\text{полн.}} = n \cdot C$ ; полная емкость при последовательном соединении  $C_{\text{полн.}} = \frac{C}{n}$ .

Энергия заряженного конденсатора  $W = \frac{q^2}{2C}$ .

Энергия электростатического поля  $W = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} \cdot V_0$ . Плотность энергии  $w = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}$ .



## ГЛАВА XIII. ЗАКОНЫ

В предыдущей главе мы изучили физические процессы, связанные с неподвижными электрическими зарядами. Теперь перейдем к рассмотрению процессов, обусловленных их движениями. При изучении явлений и процессов, обусловленных движением электрических зарядов или макроскопически заряженных тел, важнейшим понятием является понятие электрического тока.



### § 72. Сила и плотность тока

**Содержание:** электрический ток; плотность тока; зависимость плотности тока от скорости движения зарядов; скорость движения электронов; скорость распространения электрического тока; единица электрического тока:

**Электрический ток.** *Электрическим током называют любое упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов.* Под действием внешнего электрического поля положительные заряды движутся по полю, а отрицательные заряды против поля, т.е. в проводнике возникает электрический ток (рис. 113). Этот ток называют током проводимости.

За направление электрического тока условно принимают направление движения положительных зарядов, противоположное движению отрицательных зарядов. Например за направление электрического тока в металлах принимают направление, противоположное движению электронов.

О наличии электрического тока в проводнике можно судить по тем явлениям, которыми он сопровождается: нагревание проводника, изменение его химического состава, магнитное действие.

Для возникновения и существования электрического тока необходимо наличие: 1) свободных носителей тока, способных перемещаться упорядоченно; 2) наличие электрического поля, энергия которого расходовалась бы на их упорядоченное движение.

**Сила тока.** *Сила тока ( $I$ ) является количественной мерой электрического тока.* Сила тока — скалярная физическая величина, определяемая электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени:

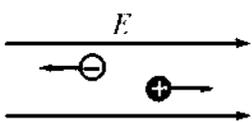


Рис. 113

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}, \quad (72.1)$$

где  $\Delta q$  — электрический заряд, проходящий за время  $t$  через поперечное сечение проводника.

Электрический ток называют постоянным, если по истечении времени величина и направление тока остаются постоянными:

$$I = \frac{q}{t} \quad (72.2)$$

Единица силы тока в СИ — ампер — является основной единицей. Она названа так в честь французского физика А. Ампера (1775—1836).

**Плотность тока.** Плотность тока — эта векторная величина, равная отношению силы тока  $I$  к площади  $S$  поперечного сечения проводника:

$$j = \frac{I}{S} \quad (72.3)$$

Вектор  $\vec{j}$  ориентирован по направлению тока.

Единица плотности тока в СИ —  $\frac{A}{m^2}$ :

$$[j] = \frac{[I]}{[S]} = 1 \frac{A}{m^2}.$$

**Зависимость плотности тока от плотности зарядов.** Теперь рассмотрим зависимость плотности тока от скорости движения зарядов в проводнике. Для этого выделим проводник в форме цилиндра (рис. 114).

Если концентрация носителей заряда в цилиндре равна  $n$ , то за время  $t$  через поперечное сечение  $\sigma$  переносится заряд

$$q = n \cdot e \cdot S \cdot \langle v \rangle \cdot t \quad (72.4)$$

Значит, сила тока

$$I = \frac{q}{t} = n \cdot e \cdot \langle v \rangle \cdot S,$$

а плотность тока

$$j = \frac{I}{S} = n \cdot e \cdot \langle v \rangle. \quad (72.5)$$

Таким образом, плотность тока в проводнике зависит от концентрации носителей свободного заряда и скорости их движения.

Следует отметить, что концентрация электронов в металлах практически остается постоянной. Она даже не зависит от температуры.

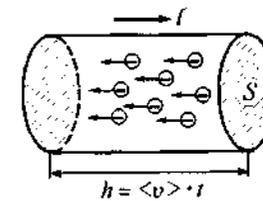


Рис. 114

**Скорость движения электронов.** Используя выражение (72.5), можно найти среднее значение скорости направленного движения электронов:

$$\langle v \rangle = \frac{j}{n \cdot e}. \quad (72.6)$$

Вычисления проведем для медного проводника ( $n = 8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ ) и для самой большой плотности  $j = 10^7 \text{ А/м}^2$ . Если подставить значение величин в (72.6) ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ ),

$$\langle v \rangle = \frac{10^7 \text{ А/м}^2}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}.$$

Средняя скорость теплового движения электронов при комнатной температуре составляет  $10^5 \text{ м/с}$ , она больше скорости упорядоченного движения электронов в проводнике более  $10^8$  раз. Тогда возникает вопрос: от чего зависит скорость распространения электрического тока?

**Скорость распространения электрического тока.** Скорость направленного движения электронов в проводнике и скорость распространения электрического тока — это не одно и то же. Скорость распространения электрического тока — это скорость распространения магнитного поля. Под действием этого поля почти все свободные электроны в проводнике одновременно начинают свое упорядоченное движение, так как скорость распространения магнитного поля равна скорости света  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ . Например, время достижения тока до потребителя, находящегося от источника на расстоянии  $l$ , определяется при помощи выражения

$$t = \frac{l}{c}.$$

**Единица электрического заряда.** Чтобы найти единицу электрического заряда, воспользуемся выражением (72.2):

$$q = I \cdot t.$$

В СИ единица заряда — кулон (Кл), она так названа в честь французского физика Ш. Кулона:

$$[q] = [I] \cdot [t] = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с} = 1 \text{ А} \cdot \text{с} = 1 \text{ Кл}.$$



#### Вопросы для самопроверки

1. Что называют электрическим током? 2. Какие процессы происходят в проводнике под действием внешнего электрического поля? 3. Что называют током проводимости? 4. Что называют направлением электрического тока? 5. Что называют током перемещения? 6. При

каких условиях возникает и существует электрический ток? 7. Что называют силой тока? 8. Что называют постоянным током? 9. Как находится сила постоянного тока? 10. В чем измеряется единица силы тока в СИ? 11. Что называют плотностью тока и в каких единицах ее измеряют? 12. Как обозначается плотность тока и от каких величин она зависит? 13. Проанализируйте зависимость плотности тока от концентрации и скорости носителей тока. 14. Чему равна средняя скорость направленного движения электронов? 15. Чему равна средняя скорость теплового движения электронов при комнатной температуре? 16. Одинаковы ли скорость распространения электрического тока и скорость направленного движения электронов в проводниках? 17. С какой скоростью совпадает скорость распространения электрического тока? 18. Чему равна скорость распространения электрического тока? 19. Как находится время, в течение которого электрический ток достигнет потребителя, если расстояние от источника тока равно  $l$ ? 20. Какова единица электрического заряда в СИ?



### § 73. Сторонние силы. Электродвижущая сила и напряжение

**Содержание:** сторонние силы; работа сторонних сил; электродвижущая сила; напряжение.

**Сторонние силы.** Как было отмечено в предыдущем параграфе, необходимые условия для создания электрического тока — это существование сил, обеспечивающих упорядоченное движение заряженных частиц. Для этого на свободные заряды должны действовать сторонние силы. Устройство, обеспечивающее возникновение сторонних сил и их действие, называют источником тока. В таких устройствах происходит разделение разноименных зарядов. Заряды под действием внешних сил, внутри источника тока, совершают движение против направления действия сил электрического поля. В результате этого на полюсах источника тока постоянно сохраняется разность потенциалов.

Схематическое изображение источников постоянного тока показано на рисунке 115. Положительный полюс источника постоянного тока изображается длинной, а отрицательный полюс — короткой линией (рис. 115 а). На полюсах генератора ставится знак «+» и «-» (рис. 115 б).

**Работа сторонних сил.** Чтобы представить себе существование и возникновение электрического тока в цепи, проведем следующий опыт. Если два разноименных проводника  $A$  и  $B$ , заряженных до потенциалов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  ( $\varphi_1 > \varphi_2$ ) соединить проводником, то по нему пойдет ток.

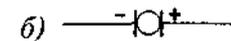
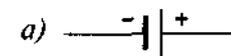


Рис. 115

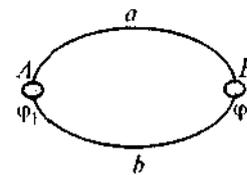


Рис. 116

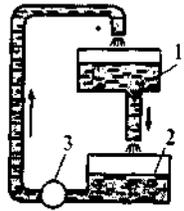


Рис. 117

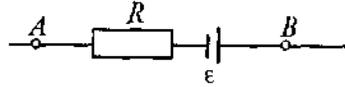


Рис. 118

Как только потенциалы тел выравниваются, ток перестает течь через проводник. Чтобы поддерживать в цепи постоянный ток, надо сохранять постоянную разность

потенциалов  $(\varphi_1 - \varphi_2) = \text{const}$ . Это можно осуществить, возвращая заряды из тела  $B$  в тело  $A$ . Другими словами, контур, по которому течет ток, должен быть замкнутым ( $AA'BB'A$ ).

Но на участке  $B$  в  $A$  заряды должны перемещаться против электрических сил.

Это перемещение могут осуществить только сторонние силы неэлектростатического происхождения. Они могут действовать на всю цепь или на ее часть.

В общем природа сторонних сил может быть различной. Например, в гальванических элементах эти силы возникают за счет химических реакций, в генераторах — за счет механической энергии вращающегося ротора и т. д. Роль источника тока в электрической цепи можно сравнить с ролью насоса, перекачивающего воду в гидравлической системе (рис. 117). Чтобы из бака 1 в бак 2 постоянно текла вода, необходимо, чтобы насос 3 постоянно перекачивал воду из нижнего бака в верхний. В противном случае когда в 1 баке кончится вода, в системе произойдет разрыв.

**Электродвижущая сила.** Для перемещения заряда сторонние силы должны совершать определенную работу. Работу сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда по всей цепи называют *электродвижущей силой (ЭДС)* источника тока.

Единица электродвижущей силы в СИ — вольт (В).

Внутри источника, по которому течет постоянный ток, одновременно могут существовать как кулоновские ( $E_{\text{кл}}$ ) силы, так и силы внешнего поля ( $E_{\text{вн}}$ ). Результирующая же напряженность поля определяется принципом суперпозиции, т. е.

$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{кл}} + \vec{E}_{\text{вн}}. \quad (73.1)$$

При протекании тока по проводнику и переносе заряда  $q$  совершают работу и кулоновские ( $A_{\text{кл}}$ ), и сторонние силы ( $A_{\text{ст}}$ ). Полная работа будет равна сумме этих сил:

$$A = A_{\text{кл}} + A_{\text{ст}}.$$

Разделив обе стороны этого уравнения на  $q$  и применив его к цепи на рисунке 118, будем иметь следующее:

$$\frac{A_{\text{AB}}}{q} = \frac{A_{\text{кл}}}{q} + \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \quad (73.2)$$

$$\frac{A_{\text{кл}}}{q} = (\varphi_A - \varphi_B) \text{ — разность потенциалов между точками } A \text{ и } B.$$

$\frac{A_{\text{ст}}}{q} = \varepsilon_{\text{BA}}$  показывает действующую на участок  $AB$  электродвижущую силу.

Тогда выражение (73.2) можно записать в виде:

$$\frac{A_{\text{AB}}}{q} = (\varphi_A - \varphi_B) + \varepsilon_{\text{BA}}. \quad (73.3)$$

**Напряжение.** *Напряжением на участке цепи  $AB$*  (падение напряжения) называется физическая величина, определяемая работой, совершаемой суммарным полем электростатических (кулоновских) и сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда на данном участке:

$$\frac{A_{\text{AB}}}{q} = U_{\text{BA}}. \quad (73.4)$$

Значит, (73.3) перепишем заново

$$U_{\text{BA}} = (\varphi_A - \varphi_B) + \varepsilon_{\text{BA}}. \quad (73.5)$$

Из выражения (73.5) видно, если не будет ЭДС,  $\varepsilon_{\text{BA}} = 0$ , то напряжение на участке цепи  $AB$  будет равно разности потенциалов

$$U_{\text{BA}} = \varphi_A - \varphi_B.$$

Если цепь разомкнута, то напряжение на клеммах равно нулю и можно измерить ЭДС.

Если  $U_{\text{BA}} = 0$ , то  $\varepsilon_{\text{BA}} = \varphi_B - \varphi_A$ .



#### Вопросы для самопроверки

1. Какие силы должны действовать, чтобы свободные заряды пришли в упорядоченное движение? 2. Что называют источником тока? 3. Какой процесс происходит в источнике тока? 4. Как схематически обозначают источники постоянного тока? 5. Если соединить тела с разными потенциалами, сколько времени по ним будет течь ток? 6. Какой должна быть разность потенциалов, чтобы поддерживать в цепи постоянный ток? 7. Какие силы могут поддерживать разность потенциалов постоянной? 8. Какой может быть природа сторонних сил? 9. Можно ли сравнить источник тока с насосом в гидравлической системе? 10. Что называют электродвижущей силой (ЭДС)? 11. Какие силы существуют внутри проводника, по которому течет постоянный ток? 12. Какие силы совершают работу при перемещении заряда? 13. Чему равна полная работа по перемеще-

нию заряда? 14. Что показывает отношение работы, совершенной кулоновскими силами к величине заряда? 15. А отношение работы, совершенной внешними силами к величине заряда? 16. Что называют напряжением и как оно определяется? 17. Чему будет равно напряжение, если нет ЭДС? 18. Как определяется ЭДС, если напряжение будет равно нулю?

### § 74. Закон Ома для участка цепи

**Содержание:** закон Ома для участка цепи; электрическое сопротивление и его единица; электрическая проводимость и ее единица.

**Закон Ома для участка цепи.** Будем рассматривать участок цепи, в котором нет источника ЭДС, т.е. будем работать с участком цепи (рис. 119). Нас интересует, как зависит ток в цепи от разности потенциалов в точках  $A$  и  $B$ , т.е. от напряжения:

$$U = \varphi_A - \varphi_B. \quad (74.1)$$

Немецкий физик Г. Ом (1787—1854) экспериментально установил, что сила тока, текущего по однородному проводнику, пропорциональна напряжению на концах проводника:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (74.2)$$

где  $R$  — электрическое сопротивление проводника.

Уравнение (74.2) выражает закон Ома для участка цепи: *Сила тока в проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника.*

**Электрическое сопротивление и единица измерения.** Из уравнения (74.2) можно определить электрическое сопротивление. Оно позволяет установить единицу сопротивления:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (74.3)$$

Единица сопротивления в СИ — Ом ( $\Omega$ ):

$$[R] = \frac{[U]}{[I]} = 1 \frac{B}{A} = 1 \text{ Ом}.$$

1 Ом — сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1 В течет постоянный ток 1 А.

**Электропроводность и ее единица.** Величина, обратная электрическому сопротивлению, называется *электропроводностью*:

$$G = \frac{1}{R}. \quad (74.4)$$

Единица электропроводности в СИ — сименс (См):

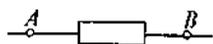


Рис. 119

$$[G] = \frac{1}{[R]} = \frac{1}{\text{Ом}} = 1 \text{ См}.$$

1 См — проводимость участка цепи с сопротивлением 1 Ом.



### Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте закон Ома для участка цепи.
2. Какая часть цепи понимается под участком цепи?
3. Как определяется электрическое сопротивление?
4. Какова единица электрического сопротивления в СИ?
5. Что называют электропроводностью?
6. Какова единица электропроводности в СИ?



### § 75. Сопротивление проводников. Зависимость сопротивления проводника от температуры

**Содержание:** сопротивление проводника; удельное сопротивление проводника; удельная электропроводность; зависимость сопротивления проводника от температуры и его использование в технике; сверхпроводимость.

**Сопротивление проводника.** Сопротивление проводника зависит от его размеров и формы, а также от материала, из которого проводник изготовлен. На основании классической теории электропроводности, причина существования электрического сопротивления — это столкновение движущихся свободных электронов с положительными ионами, находящимися в узлах кристаллической решетки. Чем длиннее проводник, тем больше бывает столкновений, и как результат — большим электрическое сопротивление; чем больше площадь поперечного сечения проводника, тем меньше вероятность столкновения и тем меньше и электрическое сопротивление. Можно сделать следующий вывод: *Сопротивление однородного проводника  $R$  прямо пропорционально его длине  $l$  и обратно пропорционально площади его поперечного сечения  $S$ :*

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (75.1)$$

где  $\rho$  — коэффициент пропорциональности, характеризующий материал проводника или удельное сопротивление проводника.

**Удельное сопротивление проводника.** Чтобы определить физический смысл удельного сопротивления  $\rho$ , из выражения (75.1) находим  $\rho$ :

$$\rho = R \frac{S}{l}. \quad (75.2)$$

Для сравнения значение величин возьмем в одних единицах:  $S = 1 \text{ м}^2$ ,  $l = 1 \text{ м}$ .

Значит, удельное сопротивление материала — это есть электрическое сопротивление проводника площадью поперечного сечения  $1\text{ м}^2$  и длиной  $1\text{ м}$ .

Единица удельного сопротивления в СИ —  $\text{Ом} \cdot \text{м}$ .

$$[\rho] = \frac{[R] \cdot [S]}{[l]} = \frac{1 \cdot \text{Ом} \cdot \text{м}^2}{1\text{ м}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Таблица 7

Удельное сопротивление некоторых проводников

Материал	$\rho, 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$
Серебро	1,6
Медь	1,7
Алюминий	2,9
Железо	9,8

**Удельная электропроводность.** Величина, обратная удельному электрическому сопротивлению, называется *удельной электропроводностью*.

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (75.3)$$

Единица ее в СИ —  $\frac{\text{См}}{\text{м}}$ .

$$[\sigma] = \frac{1}{[\rho]} = \frac{1}{1 \text{ Ом} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{См}}{\text{м}}.$$

**Зависимость сопротивления проводника от температуры.** Удельное сопротивление проводника зависит не только от природы материала, но и от ее температуры. Как показывают опыты, изменение удельного сопротивления, а следовательно, сопротивления с температурой описывается линейным законом:

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \rho_0(1 + \alpha t), \\ R &= R_0(1 + \alpha t), \end{aligned} \right\} \quad (75.4)$$

где  $\rho_0$  и  $R_0$  — удельное сопротивление и сопротивление проводника при температуре  $0^\circ\text{С}$ , а  $\rho$  и  $R$  — при  $t$ ,  $\alpha$  — называют температурным коэффициентом сопротивления. Из (75.4) находим  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 t}, \quad (75.5)$$

значит,  $\alpha$  показывает относительное изменение удельного сопротивления при изменении температуры на один градус. Для чистых металлов при не очень низких температурах  $\alpha = \frac{1}{273} \text{ К}^{-1}$ . Значит, зависимость сопротивления от абсолютной температу-

ры можно записать в следующем виде:  
 $T = t + 273,15$ .

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \alpha \rho_0 T, \\ R &= \alpha R_0 T. \end{aligned} \right\} \quad (75.6)$$

Из выражения (75.6) видно, что при нагревании сопротивление металла увеличивается, а при охлаждении — уменьшается.

Причиной этому является то, что при возрастании температуры увеличивается скорость теплового движения свободных электронов и ионов в узлах кристаллической решетки. Это в свою очередь приводит к увеличению числа их столкновений, и, как следствие, к увеличению потери энергии электронами, т.е. приводит к увеличению электрического сопротивления.

**Сверхпроводимость.** На основании (75.6) начертим график зависимости электрического сопротивления от температуры: кривая 1 на рисунке 120. Но как показали опыты, наблюдалось, что сопротивление некоторых металлов (А), Рб, Zп и др.) и их сплавов при очень низких температурах, называемых критическими  $T_{\text{кр}}$  ( $0,14 - 20\text{К}$ ), скачкообразно уменьшается до нуля и они переходили в сверхпроводящее состояние (на рис. 120 кривая 2). Это явление впервые в 1911 году наблюдал Г. Камерлинг-Оннес для ртути. Явление сверхпроводимости объясняется на основе квантовой теории.

Практическое использование явления сверхпроводимости затруднено из-за низкого значения критической температуры. Но в настоящее время существуют керамические материалы, у которых критическая температура равна  $100\text{ К}$ . Принимая во внимание, что использование явления сверхпроводимости на практике приводит к большой экономии средств, в настоящее время проводятся интенсивные исследования в этой области.

**Использование зависимости сопротивления от температуры в технике.** Действие термометров сопротивления основано на зависимости электрического сопротивления металлов от температуры. Такие термометры позволяют измерять температуру с точностью до  $0,003\text{ К}$ . Особенно их применение бесценно там, где нельзя использовать жидкостные термометры.

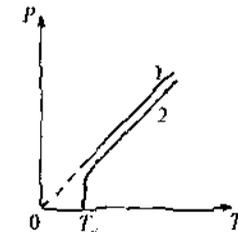


Рис. 120



#### Вопросы для самопроверки

1. Как определяется сопротивление однородного проводника? 2. Как объяснить зависимость сопротивления проводника от длины и площади поперечного сечения? 3. Какая величина характеризует природу материала? 4. Чему равно удельное сопротивление материала? 5. Каковы единицы измерения удельного сопротивления в СИ?

6. Какая величина называется удельной электропроводностью и какова ее единица в СИ? 7. Как зависит сопротивление проводника от температуры? 8. В чем заключается физический смысл температурного коэффициента сопротивления и чему равно его значение? 9. В чем заключается зависимость сопротивления от абсолютной температуры? 10. Как объясняется увеличение сопротивления с повышением температуры и уменьшение сопротивления с понижением температуры? 11. Что называют сверхпроводимостью? 12. Кто и когда впервые наблюдал явление сверхпроводимости? 13. В чем заключается практическое значение сверхпроводимости? 14. В чем причина невозможности в настоящее время широкого использования явления сверхпроводимости? 15. Где применяется явление зависимости сопротивления от температуры?

### § 76. Закон Ома для полной цепи

**Содержание:** выражение закона Ома для полной цепи и рассуждения о нем.

Рассмотрим замкнутую (полную) цепь, состоящую из источника тока с внутренним сопротивлением  $r$  и внешней цепи с сопротивлением  $R$  (рис. 121). На основании закона сохранения энергии ЭДС источника тока равна сумме падений напряжения на внутреннем и внешнем участках цепи. Так как заряд, перемещающийся по замкнутой цепи, возвращается в точку с начальным значением потенциала, то  $\phi_A = \phi_B$ .

Значит,

$$\varepsilon = IR + Ir \quad (76.1)$$

где  $IR$  и  $Ir$  — падение напряжения соответственно на внешнем и внутреннем участках цепи. Полученное из него выражение

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad (76.2)$$

выражает закон Ома для полной цепи.

*Сила тока в цепи прямо пропорциональна ЭДС цепи и обратно пропорциональна ее полному сопротивлению.*

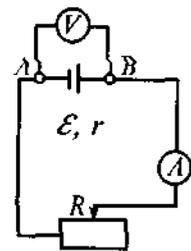


Рис. 121

Если в выбранном направлении ЭДС способствует движению положительных зарядов, то  $\varepsilon > 0$ , если в выбранном направлении ЭДС препятствует движению положительных зарядов, то  $\varepsilon < 0$ .

При использовании выражения (76.2) внутри источника ток должен иметь направление от отрицательного полюса к положительному, а во внешней цепи — от положительного полюса к отрицательному.



### Вопросы для самопроверки

1. Какая цепь имеется в виду, когда говорят о полной цепи? 2. Чему равна ЭДС в цепях с учетом закона сохранения энергии? 3. Сформулируйте закон Ома для полной цепи. 4. Когда ЭДС бывает положительной и когда отрицательной? 5. Какое направление имеет ток внутри источника ЭДС и во внешней цепи?

### § 77. Соединение проводников

**Содержание:** последовательное и параллельное соединения проводников.

**Последовательное соединение проводников.** Проводники в цепи могут быть соединены последовательно или параллельно. При последовательном соединении проводников конец первого проводника соединяется с началом второго проводника, конец второго проводника — с началом третьего и т.д. (рис. 122). Сила тока во всех частях цепи одинаковая ( $I = \text{const}$ ), полное сопротивление цепи равно сумме сопротивлений отдельных проводников, т.е.

$$I = I_1 = I_2 = I_3, \\ R = R_1 + R_2 + R_3.$$

Полное напряжение в цепи равно сумме падений напряжений на каждом проводнике:

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

**Параллельное соединение проводников.** При параллельном соединении проводников начала всех проводников соединяются в одной точке, а концы соединяются в другой точке (рис. 123), сила тока равна сумме сил токов в отдельных параллельно соединенных проводниках:

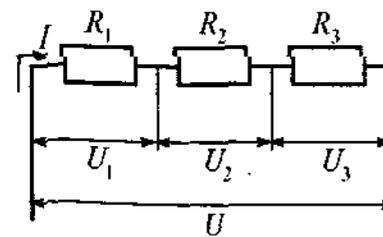


Рис. 122

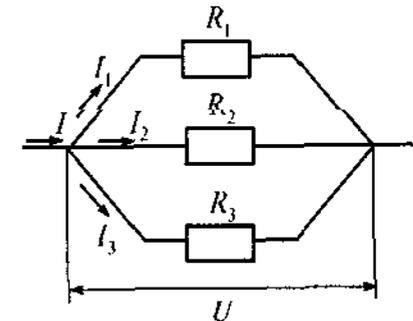


Рис. 123

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Падение напряжения же одинаковое:  $U = U_1 + U_2 + U_3 = \text{const.}$

Полное сопротивление находится при помощи сопротивлений проводников следующим образом:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$



### Вопросы для самопроверки

1. Какое соединение называют последовательным соединением проводников, покажите на чертеже? 2. Какой будет сила тока, напряжение и сопротивление в цепи при последовательном соединении? 3. Какое соединение называют параллельным соединением покажите на чертеже? 4. Какими будут сила тока, напряжение и сопротивление в цепи при параллельном соединении?



**Содержание:** последовательное и параллельное соединения источников электрической энергии.

Для обеспечения цепи необходимым количеством электрической энергии источники тока взаимно соединяются. Соединение источников в батарею может быть последовательным или параллельным

**Последовательное соединение источников электрической энергии.** При последовательном соединении разноименные полюса соседних источников взаимно соединяются (рис. 124). Из-за взаимного соединения положительного и отрицательного полюсов они имеют одинаковый потенциал. Поэтому разность потенциалов между отрицательным полюсом первого источника и положительным полюсом второго источника равна сумме ЭДС этих источников.

Если в батарее имеется  $n$  одинаковых источников, разности потенциалов между крайними полюсами замкнутой цепи в  $n$  раз больше, чем у одного источника. Таким образом, при последовательном соединении ЭДС батареи будет равна сумме ЭДС отдельных источников, составляющих батарею.

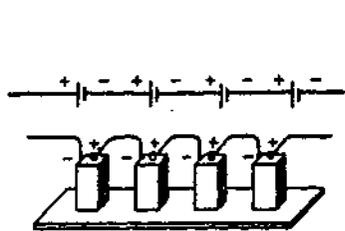


Рис. 124

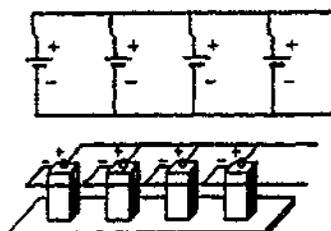


Рис. 125

Полное сопротивление батареи будет равно сумме внутренних сопротивлений отдельных источников:

$$r_b = r_1 + r_2 + \dots + r_n = nr.$$

Тогда согласно закону Ома, сила тока в такой цепи:

$$I = \frac{n\mathcal{E}}{R + nr}.$$

**Параллельное соединение источников электрической энергии.**

Если все положительные и все отрицательные полюсы источников электрической энергии взаимно соединены вместе, то такое соединение называется *параллельным соединением* (рис. 125). Обычно параллельно соединяются источники с одинаковыми ЭДС. При параллельном соединении одинаковых источников электрической энергии ЭДС батареи будет равна ЭДС одного источника.

При параллельном соединении сопротивление батареи будет меньше сопротивления одного источника. Если батарея состоит из  $n$  одинаковых источников с внутренним сопротивлением  $r$ , то сопротивление батареи будет

$$r_b = \frac{r}{n}.$$

На основании закона Ома

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r/n}.$$



### Вопросы для самопроверки

1. Для чего нужно соединять источники тока в батарее? 2. Какое соединение называют последовательным соединением источников тока? 3. Чему будет равна ЭДС батареи при последовательном соединении? 4. Чему будет равно полное сопротивление батареи? 5. Как определяется сила тока в батарее при последовательном соединении? 6. Какое соединение называют параллельным соединением источников тока? 7. Какие источники обычно соединяются параллельно? 8. Чему равна ЭДС батареи при параллельном соединении? 9. Чему будет равно сопротивление батареи при параллельном соединении? 10. Как определяется сила тока в батарее при параллельном соединении?



**Содержание:** работа и мощность тока; единица работы и мощности тока; закон Джоуля—Ленца; тепловое действие тока.

**Работа тока.** Рассмотрим однородный проводник, к которому приложено напряжение  $U$ . За время  $t$  через проводник пе-

реносится заряд  $q = It$ . Так как ток представляет собой перемещение заряда  $q$  под действием электрического поля, то по формуле (65.6) работа тока будет

$$A = q \cdot U = IUt. \quad (79.1)$$

Используя закон Ома для участка цепи, для работы тока получим

$$A = I \cdot U \cdot t = I^2 \cdot Rt = \frac{U^2}{R} t. \quad (79.2)$$

**Мощность тока.** Если учесть, что мощность — это работа, совершенная в единицу времени, то получим

$$P = \frac{A}{t} = I \cdot U = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}. \quad (79.3)$$

**Единица работы и мощности тока.** Сила тока выражается в амперах, напряжение — в вольтах, сопротивление — в омах. Работа выражается в джоулях, а мощность — в ваттах.

На практике применяются также внесистемные единицы работы тока.

1 Вт · ч. = 1 Вт · 3600 с = 3600 Дж =  $3,6 \cdot 10^3$  Дж — ч. — работа тока мощностью 1 Вт в течение 1 часа.

1 кВт · ч. = 1000 Вт · 3600 с = 3600000 Дж =  $3,6 \cdot 10^6$  Дж — работа тока мощностью в 1 кВт в течение 1 часа.

**Закон Джоуля — Ленца.** Если ток проходит по неподвижному металлическому проводнику, то вся работа тока идет на его нагревание. И по закону сохранения энергии

$$Q = A.$$

На основании (79.2) напишем:

$$Q = I \cdot U \cdot t = I^2 t \cdot R = \frac{U^2}{R} t. \quad (79.4)$$

Выражение (79.4) представляет собой закон Джоуля—Ленца (экспериментально установленный независимо друг от друга Дж. Джоулем и Э.Х.Ленцем). Причина выделения тепла при прохождении тока по проводнику заключается в том, что при своем движении свободные электроны сталкиваются с ионами в узлах кристаллической решетки и отдают им свою энергию. В результате этого усиливается колебательное движение ионов, т.е. проводник нагревается. Поэтому количество выделившегося тепла пропорционально сопротивлению проводника.

**Тепловое действие тока.** Тепловое действие тока находит широкое применение в повседневной жизни и в технике.

Лампа накаливания была открыта в 1872 году русским инженером А. Лодыгиным. Она состоит из угольной палочки, закрепленной между медными проводами. При прохождении тока угольная палочка сильно нагревается и начинает светиться. В настоящее время в качестве нити накаливания используется спираль из тонкой вольфрамовой проволоки, температура плавления которой  $3370^\circ\text{C}$ .

К нагревательным приборам относятся широко используемые электрическая плитка, электрический чайник, электрический утюг, электрический нагреватель. Еще одно устройство, используемое в промышленности, — это электрическая печь. Ее температура достигает до  $3000^\circ\text{C}$ . Еще одна область, где находит широкое применение тепловое действие электрического тока — это сварочные работы, имеющие важное значение в технике и в народном хозяйстве.

Очень много измерительных приборов, таких как гальванометр, работает на основе теплового действия тока.

Кроме полезной стороны теплового действия тока существуют и негативные стороны. В частности, бесполезно тратится огромное количество теплоты, выделяющееся на токоведущих проводах. Поэтому для этих целей используются проводники с маленьким удельным сопротивлением.



#### Вопросы для самопроверки

1. Как определяется работа тока? 2. Как определяется мощность тока? 3. Каковы единицы работы и мощности тока в СИ? 4. Каковы внесистемные единицы работы тока? 5. Когда вся работа тока расходуется на нагревание? 6. Сформулируйте закон Джоуля — Ленца. 7. В чем причина выделения тепла при прохождении тока по проводнику? 8. Как объяснить прямо пропорциональную зависимость выделившегося количества теплоты от сопротивления? 9. Как определяется удельная тепловая мощность тока? 10. Приведите пять примеров использования теплового действия тока. 11. Приведите примеры негативных сторон теплового действия тока.



#### Примеры решения задач

**Задача 1:** Определите плотность тока в железном проводнике длиной 10 м, находящегося под напряжением 6 В.

**Дано:**

$$U = 6 \text{ В};$$

$$l = 10 \text{ м};$$

$$\rho_l = 9,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

$$j = ?$$

**Решение.** Плотность тока определяется следующим выражением:

$$j = \frac{I}{S}.$$

Если теперь воспользуемся законом Ома для участка цепи  $I = \frac{U}{R}$ , то выра-

жние для плотности тока примет следующий вид:  $j = \frac{U}{R \cdot S}$ , где  $R = \rho \frac{l}{S}$  — сопротивление проводника.

Тогда

$$j = \frac{U \cdot S}{\rho \cdot l \cdot S} = \frac{U}{\rho \cdot l}$$

Воспользовавшись данными, находим:

$$j = \frac{6}{9,8 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \text{ м}^2} = 6,12 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2} = 6,12 \frac{\text{МА}}{\text{м}^2}$$

Ответ:  $j = 6,12 \text{ МА/м}^2$ .

**Задача 2.** Спираль электрокипятильника состоит из двух частей. Если соединить только первую часть, вода закипает за 15 минут, если соединить только вторую часть, вода закипает за 30 минут. За какое время вода закипает, если обе части соединить: 1) последовательно; 2) параллельно?

**Дано:**

$$t_1 = 15 \text{ мин} = 900 \text{ с};$$

$$t_2 = 30 \text{ мин} = 1800 \text{ с};$$

$$1) t_{\text{пос}} = ?$$

$$2) t_{\text{пар}} = ?$$

для первой части:

$$Q_1 = I^2 R_1 t_1, \quad (1)$$

для второй части:

$$Q_2 = I^2 R_2 t_2, \quad (2)$$

при последовательном соединении

$$Q_{\text{пос}} = I^2 R_{\text{пос}} t_{\text{пос}} = I^2 (R_1 + R_2) t_{\text{пос}}, \quad (3)$$

при параллельном соединении

$$Q_{\text{пар}} = I^2 R_{\text{пар}} t_{\text{пар}} = I^2 \left( \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \right) t_{\text{пар}}. \quad (4)$$

Из равенства выражений (1) и (2) получаем

$$I^2 R_1 t_1 = I^2 R_2 t_2, \text{ или } R_1 = \frac{R_2 t_2}{t_1}$$

Также приравняв выражения (2) и (3), получаем

$$I_2 (R_1 + R_2) t_{\text{пос}} = I^2 R_2 t_2, \text{ или } t_{\text{пос}} = \frac{R_2 t_2}{R_1 + R_2}. \quad (6)$$

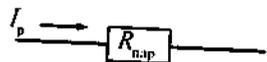


Рис. 126

Приравняв выражения (2) и (4), получаем

$$I^2 \left( \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \right) t_{\text{пар}} = I^2 R_2 t_2, \text{ или } t_{\text{пар}} = \frac{t_2 (R_1 + R_2)}{R_1}. \quad (7)$$

Теперь значение  $R_1$  из (5) подставим в (6) и (7):

$$t_{\text{пос}} = \frac{t_2 \cdot t_2}{t_1 + t_2} \text{ и } t_{\text{пар}} = t_1 + t_2.$$

Используя данные, находим:

$$t_{\text{пос}} = \frac{900 \cdot 1800}{900 + 1800} \text{ с} = 600 \text{ с} = 10 \text{ мин},$$

$$t_{\text{пар}} = 900 \text{ с} + 1800 \text{ с} = 2700 \text{ с} = 45 \text{ мин}.$$

Ответ:  $t_{\text{пос}} = 10 \text{ мин}; t_{\text{пар}} = 45 \text{ мин}.$



### Задачи для самостоятельного решения

- Чему равна плотность тока, если через проводник с площадью поперечного сечения  $1,6 \text{ мм}^2$  за  $2 \text{ с}$  проходит  $2 \cdot 10^{19}$  электронов? ( $j = \text{А/мм}^2$ )
- Амперметр с шунтом измеряет ток до  $10 \text{ А}$ . Какой наибольший ток может измерить амперметр, если сопротивление амперметра  $0,02 \text{ Ом}$ , а сопротивление шунта  $50 \text{ Ом}$ ? ( $I = 2 \text{ А}$ )
- ЭДС батареи  $12 \text{ В}$ . Найти внутреннее сопротивление батареи, если при силе тока  $4 \text{ А}$  его КПД будет равен  $\eta = 0,6$ . ( $r = 1,2 \text{ Ом}$ )
- Если внешнее сопротивление равно  $80 \text{ Ом}$ , сила тока в цепи  $0,8 \text{ А}$ , если внешнее сопротивление  $15 \text{ Ом}$ , то сила тока  $0,5 \text{ А}$ , найти силу тока, при коротком замыкании источника ЭДС. ( $I_{\text{к.з.}} = 0,46 \text{ А}$ )

### Тестовые вопросы

1. В какое движение приходят заряды в проводнике под действием внешнего электрического поля?

А. Положительные заряды по полю, отрицательные заряды против поля.

В. Отрицательные заряды по полю, положительные заряды против поля.

С. Не двигаются.

Д. Все заряды движутся по полю.

Е. Нет правильного ответа.

2. Определите формулу плотности тока:

А.  $\rho = \frac{j}{V}$ .

В.  $j = \frac{j}{S}$ .

С.  $j = \frac{U}{S}$ .

Д.  $\rho = \frac{j}{l} \cdot a$ .

Е. Правильного ответа нет.

3. Как называется работа сторонних сил при перемещении по всей цепи единичного положительного электрического заряда?

А. Работа, совершаемая внешними силами. В. Электродвижущая сила. С. Сила действия электрического тока. D. Единицы внешних сил. Е. Нет правильного ответа.

4. У каких из нижеприведенных проводящих материалов сопротивление самое большое?

А. Серебро. В. Алюминий. С. Медь. D. Железо. Е. У всех материалов сопротивление одинаковое.

5. Кем была изобретена первая лампа накаливания?

А. Эдисоном. В. Лодыгиным. С. Джоулем. D. Фарадеем. Е. Несколькими русскими учеными.

### Основные выводы

*Электрическим током* называется любое упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов:  $I = \Delta Q / \Delta t$ .

*Сила тока* определяется электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени.

*Плотность тока* — это векторная величина, равная отношению силы тока  $I$  к площади  $S$  поперечного сечения проводника:

$$j = \frac{I}{S} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с. Единица в СИ — } 1 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

Скорость распространения электрического тока равна скорости распространения электрического поля, т.е. скорости распространения света  $3 \cdot 10^8$  м/с.

Электродвижущей силой (ЭДС) источника тока называют работу, совершаемую сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда по всей цепи.

*Закон Ома для участка цепи:*  $I = U/R$ .

*Сопротивление проводника:*  $R = \rho \frac{l}{S}$ . Единица сопротивления в СИ — 1 Ом.

*Зависимость сопротивления проводника от температуры:*  $R = R_0(1 + \alpha t)$ .

*Явлением сверхпроводимости* называют скачкообразное уменьшение сопротивления проводника до нуля при понижении температуры.

*Закон Ома для полной цепи:*  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ .

*Работа тока:*  $A = IUt = I^2 \cdot Rt = \frac{U^2}{R} t$ .

*Мощность тока:*  $P = \frac{A}{t} = I \cdot U = I^2 R = \frac{U^2}{R}$ .

*Закон Джоуля—Ленца:*  $Q = I \cdot U \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t = \frac{U^2}{R} t$ .



## ГЛАВА XIV ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

В предыдущей главе мы познакомились с понятием об электрическом токе и его основными законами. В рассуждениях разговор в основном велся о проводниках первого типа — металлах. В этой же главе проведем более глубокое рассуждение и вместе с этим ознакомимся с законами тока в проводниках второго типа — растворах и газах. Значение законов тока в проводниках второго типа в технике определяет их более глубокое изучение. Очень важное значение имеет изучение природы электрического тока в полупроводниках, составляющих основу быстро развивающихся в последнее время и являющихся неотъемлемой частью нашей повседневной жизни радиотехнических устройств и электронно-вычислительных машин.



### § 80. Электрический ток в металлах

**Содержание:** носители заряда в металлах; свободные электроны.

**Носители зарядов в металлах.** О носителях заряда в металлах существовали различные рассуждения. Рассуждение о том, что такими частицами являются слабо связанные с ионами кристаллической решетки электроны, было выдвинуто немецким физиком П. Друде (1863 — 1906) и им была создана классическая теория электронной проводимости металлов. Эта его идея получила развитие в работах Х. Лоренца, а также в ряде классических опытов. Немецкий физик К. Рикке (1845—1915) в 1901 году провел следующий опыт. Он соединил последовательно три очень хорошо отполированных цилиндра одинакового радиуса, изготовленные из Cu, Al, Cu и пропускал через них очень большой заряд ( $\approx 3,5 \cdot 10^6$  Кл) (рис. 127).

Если бы носителями заряженных частиц были бы ионы, то в цилиндрах должны были быть образцы соседнего металла. Но даже очень тщательные проверки не обнаружили никаких, даже микроскопических, следов переноса вещества.

Значит, перенос заряда в металлах осуществлялся частицами, которые являются общими для всех металлов. Такими частицами могли быть открытые в 1887 году английским физиком Дж. Томсоном (1856—1940) электроны.

Еще несколько опытов, подтверждающих, что носителями зарядов в металлах являются электроны, были проведены рус-

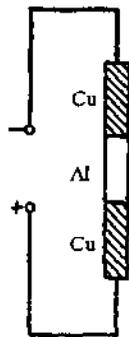


Рис. 127

ским физиком С. Манделъштамом (1879—1944), а идею опыта предложил Н. Папалекси (1886—1947).

Идея подобных опытов такова: если в металле имеются слабосвязанные свободные носители зарядов, то при резком торможении проводника эти частицы должны по инерции смещаться вперед, как смещаются вперед пассажиры, стоящие в автобусе при его торможении, и в результате должен появиться электрический ток (рис. 128). Множество проведенных опытов полностью подтвердили эту идею и доказали, что носителями электрического тока в металлах являются свободные электроны.

**Свободные электроны.** Так откуда в металлах берутся свободные электроны? Их существование объясняется следующим образом: при образовании кристаллической решетки металла электроны, слабо связанные с атомными ядрами, отрываются от атомов металла, становятся «свободными» и могут перемещаться по всему объему. Таким образом, в узлах кристаллической решетки располагаются ионы металла, а между ними хаотично движутся свободные электроны, образуя своеобразный электронный газ, обладающий свойствами идеального газа. Электроны при своем движении сталкиваются с ионами решетки, в результате чего между ними устанавливается термодинамическое равновесие. Расчеты показывают, что при  $T=300\text{ К}$  средняя скорость теплового движения электрона равна  $\langle u \rangle = 1,1 \cdot 10^5\text{ м/с}$ . Средняя скорость движения электронов под действием электрического поля равна  $\langle v \rangle = 8 \cdot 10^{-4}\text{ м/с}$  (см. § 72). Т.е. как было отмечено выше, скорость направленного движения электронов меньше их средней скорости теплового движения порядка  $10^8$  раз. Поэтому эта скорость не может быть скоростью распространения электрического тока. Причина мгновенной передачи электрического тока на большие расстояния — распространение при замыкании цепи электрического поля по цепи со скоростью света ( $c = 3 \cdot 10^8\text{ м/с}$ ). В результате по всей цепи возникает постоянное электрическое поле и приводит электроны в упорядоченное движение. Поэтому при замыкании цепи в ней возникает электрический ток.

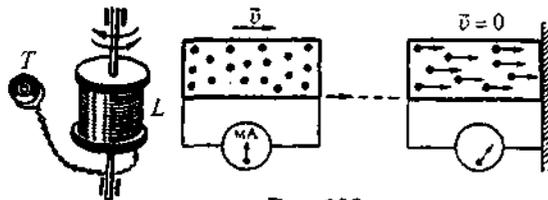


Рис. 128



### Вопросы для самопроверки

1. Какие проводники называют проводниками второго типа? 2. В чем значение изучения электрической проводимости в проводниках второго типа? 3. В чем заключается теория Друде? 4. В чем суть опыта Рикке и его значение? 5. Каковы выводы, сделанные из опытов Рикке? 6. В чем суть опыта, проведенного Манделъштамом по предложению Папалекси? 7. Откуда появляются электроны в металлах? 8. Почему скорость направленного движения электронов не может быть скоростью электрического тока?



### § 81. Работа выхода

**Содержание:** работа выхода; причина существования работы выхода; потенциальный барьер; единица энергии в электрон-вольтах.

**Работа выхода.** Как было изложено в предыдущей теме, свободные электроны при нормальной температуре имеют определенную тепловую скорость движения  $\langle u \rangle = 1,1 \cdot 10^5\text{ м/с}$  и кинетическую энергию  $E_k = \frac{m \langle u \rangle^2}{2} \approx 5,5 \cdot 10^{-21}\text{ Дж}$ . Но они не могут покинуть металл.

Следовательно, должна существовать какая-то сила, удерживающая их в металле. Чтобы покинуть металл, электрон должен преодолеть сопротивление этой силы, т. е. совершить против силы работу. Работа, которую нужно затратить для удаления электрона из твердого тела в вакуум, называется *работой выхода*.

**Причина возникновения работы выхода.** Основная причина возникновения работы выхода, следующая:

1) Если электрон по какой-то причине удаляется из металла, то в том месте, которое он покинул, возникает избыточный положительный заряд, и согласно закону Кулона электрон притягивается к нему (рис. 129);

2) отдельные электроны, покидая металл, удаляются от него на расстояние порядка атомных и создают над поверхностью ме-

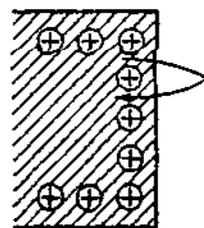


Рис. 129

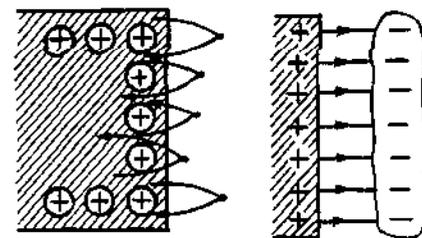


Рис. 130

талла «электронное облако». Это облако вместе с наружным слоем положительных ионов решетки образует двойной электрический слой. Он как у заряженного плоского конденсатора сосредоточивает всю энергию между слоями и не создает электрического поля во внешнем пространстве. Для того чтобы преодолеть этот двойной слой, электрон должен совершить определенную работу (рис. 130).

**Потенциальный барьер.** Таким образом, электрон при вылете из металла должен преодолеть потенциальный барьер  $\Delta\phi$ , который образуется между поверхностью металла и электронным облаком. Этот барьер препятствует вылету электрона из металла. Для того чтобы преодолеть этот барьер, электрон должен совершить определенную работу. Работа выхода определяется с помощью следующей формулы:

$$A = e \cdot \Delta\phi. \quad (81.1)$$

Если кинетическая энергия электрона выполняет следующее условие:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} > A, \quad (81.2)$$

электрон покидает металл. Потенциал  $\Delta\phi = u_i = \frac{A}{e}$  называют потенциалом ионизации.

**Электрон-вольтная единица энергии.** Обычно работа выхода выражается в электрон-вольтах (эВ). 1 эВ — это энергия, которую электрон получает при прохождении разности потенциалов в 1 В:

$$1 \text{ эВ} = 1 \text{ В} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} = 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \cdot \text{Кл} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

При комнатной температуре число электронов, обладающих достаточной энергией, чтобы покинуть металл, очень мало, работа зависит от природы металла. Энергия электрона при комнатной температуре ( $T \approx 300 \text{ К}$ ):

$$kT = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 300 \text{ К} = 4,15 \cdot 10^{-21} \text{ Дж} = 0,026 \text{ эВ}.$$

В следующей таблице приведены работы выхода электронов для некоторых металлов:

Металл	A, эВ	Металл	A, эВ
Алюминий	3,7	Платина	6,3
Вольфрам	4,5	Цинк	4,0
Литий	2,3	Цезий	1,8
Медь	4,3		



## Вопросы для самопроверки

1. Чему равна кинетическая энергия теплового движения электронов в металлах?
2. Почему электрон не может покинуть металл?
3. Какая работа называется работой выхода?
4. Назовите первую причину существования работы выхода.
5. Назовите вторую причину существования работы выхода.
6. Как образуется потенциальный барьер?
7. Чему равна высота потенциального барьера?
8. Как определяется работа выхода электрона из металла?
9. При выполнении какого условия электрон может покинуть металл?
10. Какая энергия называется 1 эВ?
11. Скольким джоулям равен 1 эВ?
12. Скольким эВ будет равна энергия электрона при комнатной температуре?



## § 82. Явление эмиссии в вакуумных диодах

**Содержание:** электронная эмиссия, термоэлектронная эмиссия; вакуумный диод; вольт-амперная характеристика диода; вакуумный триод; электронно-лучевая трубка.

**Электронная эмиссия.** Если сообщить электронам в металлах энергию, необходимую для преодоления работы выхода, то часть электронов может покинуть металл. Такое явление носит название электронной эмиссии. В зависимости от способа сообщения электронам энергии различают термоэлектронную, фотоэлектронную и автоэлектронную эмиссии.

**Термоэлектронная эмиссия.** Термоэлектронной эмиссией называется испускание электронов нагретыми металлами. В металлах очень большая концентрация свободных электронов, поэтому даже при средних температурах существуют электроны, способные совершить работу выхода и покинуть металл. С повышением температуры число электронов, кинетическая энергия которых больше работы выхода, растет и явление термоэлектронной эмиссии становится заметным. Законы термоэлектронной эмиссии можно изучать с помощью двухэлектродной лампы — вакуумного диода.

**Вакуумный диод.** Вакуумный диод содержит два электрода — катод K и анод A. Катод изготавливается в виде нити из тугоплавкого металла (например вольфрама), накаливаемой электрическим током. Анод чаще всего имеет форму металлического цилиндра, окружающего катод (рис. 131 а). Если диод включить в цепь, как показано на рисунке, то при накаливании катода и соединении анода с положительным полюсом источника, а катод с отрицательным, то в цепи возникает ток. Если теперь поменять полярность батареи, то сколько бы мы ни накаливали катод, ток в цепи прекращается. Следовательно, катод испускает отрицательно заряженные частицы — электроны.

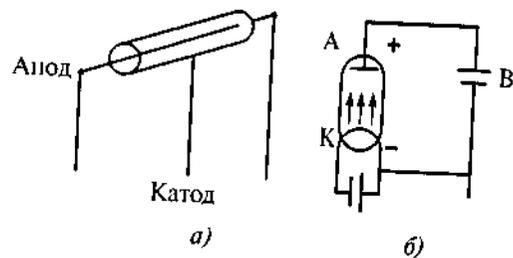


Рис. 131

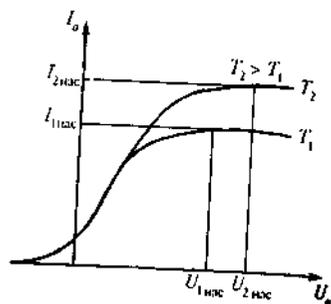


Рис. 132

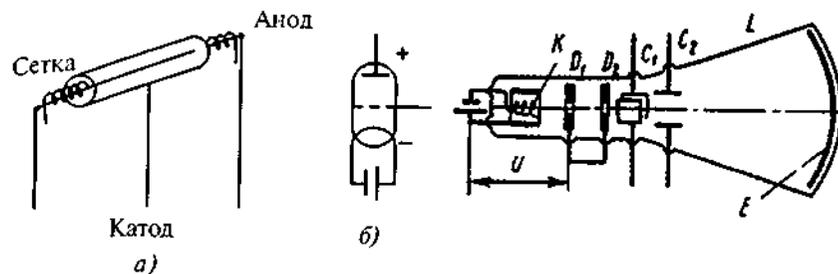


Рис. 133

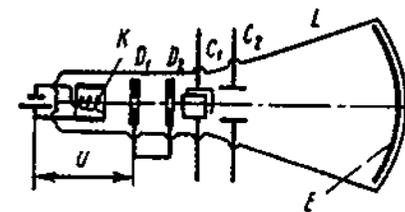


Рис. 134

**Вольт-амперная характеристика диода.** Теперь, поддерживая температуру катода постоянной, снимем зависимость анодного тока  $I_a$  от анодного напряжения  $U_a$ , т.е. построим вольт-амперную характеристику (рис. 132).

Оказывается, она не является линейной, т.е. для вакуумного диода закон Ома не выполняется. В начале с увеличением напряжения ток медленно увеличивается. В это время отрицательно заряженное электронное облако отталкивает вылетающие из катода электроны, под действием силы отталкивания часть электронов возвращается на катод, незначительному числу электронов удается долететь до анода.

По мере увеличения анодного напряжения уменьшается плотность электронного облака и сила тока увеличивается. При определенном значении напряжения  $U_a = U_{нас}$  все электроны, покидающие катод, достигают анода и сила тока возрастает до своего максимального значения, поэтому дальнейшее увеличение напряжения не может привести к увеличению силы тока. Это значение силы тока называют током насыщения  $I_{нас}$ . Если теперь изменится температура катода, то изменится и значение тока насыщения.

Если теперь поменять полюса батареи, то тока в цепи не будет. Следовательно, диоды обладают свойством пропускать ток только в одном направлении.

**Вакуумный триод.** Для управления током лампы в нее вводят один, два или несколько дополнительных электродов, называемых сетками (рис. 133). Обычно сетка представляет собой спиральную проволоку, расположенную между анодом и катодом (рис. 133 а). Сетка располагается ближе к катоду таким образом, что незначительное изменение потенциала в ней приводит к изменению анодного тока. Если потенциал сетки относительно катода будет равен нулю, триод работает как диод. Когда потен-

циал сетки положительный, то плотность электронного облака незначительное и, значит, ток будет большим. При отрицательном потенциале сетки плотность электронного облака у катода увеличивается, ток же уменьшается. По мере увеличения отрицательного потенциала сетки ток уменьшается и при определенном значении отрицательного потенциала сетки становится равным нулю. Отрицательное значение напряжений сетки, при котором ток становится равным нулю, называется *напряжением запираения*. Напряжение запираения зависит от анодного напряжения. Чем больше будет  $U_a$ , тем больше будет и запирающее напряжение. Значит, изменяя напряжение сетки, можно управлять анодным током в цепи, поэтому сетку называют управляющей.

Электронные лампы широко применяются в различных радиотехнических устройствах, в частности, в усилителях, генераторах.

**Электронно-лучевая трубка.** Схема устройства электронно-лучевой трубки представлена на рисунке 134. Она представляет собой стеклянный баллон, из которого откачан воздух  $L$ , внутри расположены «электронная пушка», состоящая из разогретого катода, из которого вылетают электроны, и анодов в виде диафрагм  $D_1$  и  $D_2$ . Разность потенциалов  $U$  между анодом и катодом разгоняет электроны до большой скорости и создает узкий пучок. Когда пучок электронов попадает на флюоресцирующий экран  $E$ , появляется светящаяся точка. Пучок электронов управляется двумя взаимно перпендикулярно расположенной парой конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ . Поле конденсатора  $C_1$  отклоняет луч в горизонтальном направлении, поле конденсатора  $C_2$  в вертикальном направлении. В зависимости от напряжения, подаваемого на пластины конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ , электронный луч на экране может стоять на месте, двигаться прямолинейно или описывать синусоиды. Электронно-лучевая трубка составляет основу устройства, называемого осциллографом, и телевизора.



### Вопросы для самопроверки

1. Какой процесс называется электронной эмиссией? 2. А какой термоэлектронной эмиссией? 3. Как влияет явление термоэлектронной эмиссии на возрастание скорости? 4. Как устроен вакуумный диод? 5. К каким полюсам источника присоединяют анод и катод и почему? 6. Почему катод нагревается? 7. Из какого электрода вылетает электрон? 8. Что такое вольт-амперная характеристика диода? 9. Объясните нелинейный характер вольт-амперной характеристики. 10. Какой ток называется током насыщения? 11. Если поменять местами полюса источника, будет ли ток в цепи диода? 12. Где используются диоды? 13. Какое устройство называется вакуумным триодом? 14. Какова роль сетки в триоде? 15. Какое напряжение называется запирающим? 16. Где используются триоды? 17. Как устроена электронно-лучевая трубка? 18. Где используется электронно-лучевая трубка? 19. Как образуется пучок электронов? 20. Как управляются электронные пучки?

### § 83. Электрический ток в газах. Самостоятельный и несамостоятельный разряд

**Содержание:** разряды в газах; рекомбинация, несамостоятельный разряд; коронный разряд; искровой разряд; тлеющий разряд; электрическая дуга.

**Разряды в газах.** При не слишком высоких температурах газ не пропускает электрический ток. Чтобы газ стал проводником электричества, часть его молекул должна ионизоваться, т.е. произойти расщепление нейтральных молекул на ионы и свободные электроны. Для этого газ надо подвергнуть действию какого-либо ионизатора. Под действием ионизатора из электронной оболочки атома или молекулы отрывается один или несколько электронов, что приводит к образованию в газе свободных электронов и положительных ионов. Электроны в свою очередь могут присоединиться к нейтральным атомам или молекулам, превращая их в отрицательные ионы. Следовательно, в ионизованном газе имеются положительные и отрицательные ионы и свободные электроны.

**Рекомбинация.** В газе одновременно с процессом ионизации происходит и образование нейтральных атомов или молекул, такой процесс называют рекомбинацией. Если прекращается действие внешнего ионизатора, то проводимость газа ухудшается. Если действие ионизатора остается постоянным, то между процессами ионизации и рекомбинации устанавливается равновесие. Здесь число вновь образующихся частиц равно среднему числу пар, исчезающих вследствие рекомбинации.

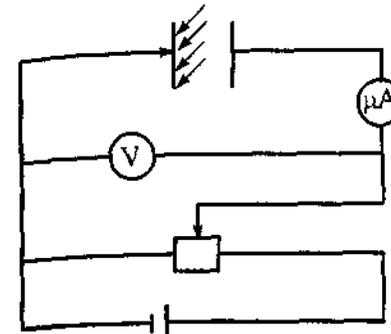


Рис. 135

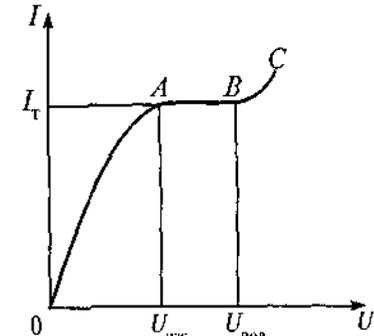


Рис. 136

**Несамостоятельный разряд.** Разряды, существующие только под действием внешних ионизаторов, называют несамостоятельными. Пусть в пространство между пластинами конденсатора действует ультрафиолетовое излучение (рис. 135). Между пластинами конденсатора происходит процесс ионизации, появляются противоположно заряженные частицы. Если напряжение между пластинами конденсатора равно нулю (на рис. 136 точка 0), ток тоже будет равен нулю, так как образованные носители заряда двигаются хаотично. По мере увеличения напряжения между пластинами конденсатора большее число электронов и ионов начинают направленное движение. Они достигают пластин конденсатора и ток возрастает. При достижении напряжения значения  $U_{нас}$  все образованные заряды достигают пластины и ток для этой степени ионизации достигает своего наивысшего значения  $I_{нас}$ . Увеличение напряжения до значения  $U_{под}$  не может изменить значения тока. Если действие ионизатора прекращается, то прекращается и разряд, так как нет других источников ионов. Поэтому этот разряд называют *несамостоятельным* разрядом.

**Самостоятельный разряд.** При дальнейшем увеличении напряжения ( $U_{под}$  и выше) сила тока резко возрастает. Если теперь прекратить действие внешнего ионизатора, то разряд не прекратится. Значит, теперь разряд сам создает ионы, необходимые для поддержания электропроводности газа. Разряд в газе, сохраняющийся после прекращения действия внешнего ионизатора, называется самостоятельным.

Напряжение  $U_{под}$ , при котором происходит самостоятельный разряд, называют *напряжением поджига*, или *напряжением пробоя*.

Самостоятельный разряд возникает в результате ударной ионизации электронами, ускоренной под действием электрического поля. Электроны под действием поля  $\vec{E}$  совершают ускоренное

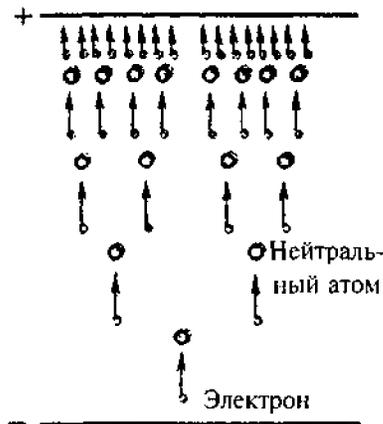


Рис. 137

движение и за счет работы сил электрического поля увеличивается их кинетическая энергия. Если энергия электрона будет равна или больше энергии ионизации атома, то при их столкновении атом может ионизоваться. В результате образуется еще один положительный ион и электрон. Из-за того, что энергия электрического поля большая, электрон, потерявший свою энергию, и вновь образованный электрон приобретают энергию, достаточную для ионизации. В следующем столкновении теперь образуется четыре электрона и два

иона. После третьего столкновения число электронов будет равно восьми, после четвертого — шестнадцати и т.д. В результате образуется электронно-ионная лавина (рис. 137).

Для поддержания самостоятельного разряда необходимо существование электронного и ионного потока, возникновение электронно-ионной лавины, но этого недостаточно. После удаления внешнего ионизатора необходимо, чтобы снова образовались электроны вместо электронов, достигших катода. Эти электроны выбиваются из катода положительными ионами, движущимися в сторону катода под действием поля, и фотонами. Процесс выбивания электронов с поверхности катода называется *вторичной электронной эмиссией*. Число выбитых электронов зависит от энергии иона и материала катода. Одновременное возникновение электронно-ионной лавины и вторичной электронной эмиссии приводит к появлению самостоятельного разряда. В этом случае происходит пробой газового промежутка и поджигание газового разряда.

**Коронный разряд.** Если при атмосферном давлении взять два электрода: один острый, а другой плоский и с их помощью создать неоднородное поле, то напряженность электрического поля около каждого из них будет различной. У острого плотность зарядов будет очень большая, поэтому при увеличении напряжения напряженность поля в этом месте достигнет значения  $E_3$  раньше, чем у плоского электрода. Когда напряженность поля около острого электрода достигнет значения 30 кВ/см, происходит пробой газа и вокруг электрода возникает свечение, имеющее вид короны. Поэтому такой разряд называется коронным разрядом.

В природе коронный разряд возникает под влиянием атмосферного электричества на вершинах деревьев, мачтах кораблей и других заостренных предметов. Также его можно наблюдать около высоковольтных линий электропередач. В технике коронный разряд используется в электрических фильтрах для очистки, использующихся в промышленности газов, от твердых и жидких примесей.

**Искровой разряд.** С повышением напряжения вместо короны возникает еще больший поток электронов, появляются каналы ярких зигзагообразных полосок, коронный разряд переходит в искровой разряд. Если теперь еще больше увеличить напряжение, полоски разрастаются и удлиняются и одни из них достигают второго электрода, происходит пробой воздуха и возникает искра. Искра приводит к обрыванию разряда, т.е. после пробоя газа напряжение на электродах резко уменьшается, т.е. между электродами происходит короткое замыкание. Искровой разряд пропадает, напряжение еще больше увеличивается и процесс пробоя повторяется.

Примером гигантского искрового разряда может быть молния. Известно, что на поверхности Земли существует электрическое поле, перед грозой оно сильно увеличивается. Обычно в нижней части облака, обращенной в сторону Земли, бывают положительные, а в верхней части — отрицательные заряды. Молния возникает между двумя облаками или между облаком и Землей. Некоторые разряды молнии длятся микросекунды, сила тока достигает 500 000 А. Напряжение до возникновения молнии может достигать  $10^8 - 10^9$  В. Во время молнии воздух сильно нагревается, возникает ударная волна и гремит гром.

Для защиты различных зданий от молнии устанавливают громоотводы. Они изготавливаются из заостренных металлических стержней и устанавливаются выше защищаемых зданий и надежно заземляются. Принцип их работы основывается на отводе зарядов из острия стрелы в землю.

**Электрическая дуга.** Если в цепи имеется сильный источник тока, то искру можно превратить в электрическую дугу. Электрическая дуга была впервые получена в 1802 году русским физиком В. Петровым. Он брал две угольные пластины, соединял их с сильной батареей гальванических элементов, затем сближал их до соприкосновения, а потом начинал их разводить. Так как соединение было не идеальным, в местах соприкосновения угольных пластин возникало большое сопротивление. При протекании тока хотя и наблюдалось нагревание проводов, соединенных с угольными пластинами, но из-за небольшой теплопроводности угольные пластины не нагревались. При разводе угольных пластин из-за термоэлектронной эмиссии разогретого катода происходила тепловая ионизация газового пространства. Наи-

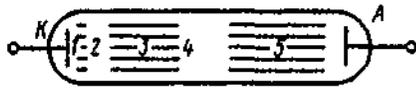


Рис. 138

более горячее место дуги — ямка, образованная в месте разрыва потока электронов на положительном электроде, называется началом дуги. В начале

дуги при атмосферном давлении температура может повышаться до 4000 °С. Основной причиной возникновения дугового разряда является термоэлектронная эмиссия, т.е. испускание электронов сильно нагретыми телами. Дуговой разряд применяется для сварки и резки металлов, как мощный источник света используется в прожекторах, проекционных и киноаппаратах.

**Тлеющий разряд.** Если из стеклянной трубки откачать воздух и на электроды, установленные в ней, подать несколько сот вольт постоянного напряжения, то возникает газовый разряд. Этот разряд называется *тлеющим разрядом* (рис. 138).

При разрядении газа увеличивается расстояние между атомами и в результате увеличивается длина свободного пробега электронов. В результате, даже если напряжение между электродами небольшое, электроны могут накопить достаточно энергии для ионизации при столкновении. Если теперь оставив напряжение постоянным, медленно уменьшать давление, то сначала возникает прерывистый разряд, затем появляется разряд в виде светящегося извилистого шнура, идущего от катода к аноду. При давлении порядка 1—15 Па разряд имеет вид, схематически изображенный на рисунке 138. Непосредственно к катоду прилегает тонкий светящийся слой 1 (катодная пленка), затем следует катодное темное пространство 2, переходящее в светящийся слой 3 (тлеющее свечение) и затем располагается так называемое фарадеево темное пространство — вторая темная фаза 4. После нее располагается яркая область 5, ее называют положительным столбом.

Причина такого свечения газа при тлеющим разряде в распределении потенциалов в разрядной трубке. Свечение положительного столба — это есть излучение возбужденных атомов, поэтому они имеют характерный цвет. Это используется в рекламах. Если трубка заполнена неонам, свечение будет желто-красным, а если аргоном, то синевато-зеленым.

Вещество катода в тлеющем разряде сильно нагреваясь, переходит в парообразное состояние. Это используется при металлизации стекла, для получения зеркала и полупрозрачных пластин.



#### Вопросы для самопроверки

1. Почему при не очень высоких температурах в газах не течет ток?
2. Какое условие должно выполняться, чтобы в газе появился элект-

рический ток? 3. Что называют газовым разрядом? 4. Откуда появляются ионы в газах? 5. Какой процесс называют рекомбинацией? 6. Какое состояние называют динамическим равновесием? 7. Какой разряд называют несамостоятельным? 8. Когда ток достигает значения насыщения  $I_n$ ? 9. Какой разряд называют самостоятельным? 10. Какое напряжение называют напряжением пожара? 11. Как образуются потоки электронов и ионов в самостоятельном разряде? 12. Достаточно ли для образования самостоятельного разряда наличие потока электронов и ионов? 13. Какой процесс называют вторичной электронной эмиссией? 14. Какой разряд называют коронным разрядом? 15. Где можно наблюдать коронный разряд? 16. Где применяются коронные разряды? 17. Как образуется искровой разряд? 18. К каким разрядам относится молния? Как и где она образуется? 19. Каким будет значение силы тока и напряжения в молнии? 20. Для чего нужны устройства защиты от молнии и как они работают? 21. Как образуется электрическая дуга? 22. В чем причина возникновения электрической дуги? 23. Где используется электрическая дуга? 24. Как образуется тлеющий разряд? 25. Объясните излучение тлеющего разряда. 26. В чем причина различного излучения тлеющего разряда? 27. Как применяется тлеющий разряд в технике?



#### § 84. Понятие о плазме

**Содержание:** плазма; свойства плазмы; применение плазмы; плазма и космос.

**Плазма.** Это понятие относительно новое, его изучение началось в двадцатых годах прошлого столетия. *Плазмой* называют частично или полностью ионизованный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы. По мере повышения температуры число электронов и ионов возрастает и настолько же уменьшается число нейтральных атомов. Такую плазму называют электронно-ионной плазмой. Так как концентрация электронов в ней равна концентрации ионов, то можно считать ее электронейтральной, а плотность зарядов равной нулю.

**Свойства плазмы.** Плазма обладает рядом специфических свойств, отличных от свойств нейтрального газа. Эти свойства позволяют ее рассматривать как особое четвертое состояние вещества. В отличие от взаимодействия между молекулами нейтрального газа, взаимодействие частиц в плазме характеризуется кулоновскими силами притяжения и отталкивания.

Частицы плазмы, особенно электроны, легко перемещаются под действием электрического поля. Электрические и магнитные поля, воздействуя на плазму, приводят к появлению объемных зарядов и тока.

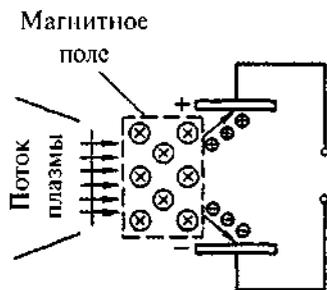


Рис. 139

По свойству электропроводности плазма похожа на металлы, т.е. является хорошим проводником электричества. В отличие от металлов с повышением температуры электропроводность плазмы улучшается. Плазма обладает и хорошей теплопроводностью. Вследствие этого плазма легко теряет количество теплоты: электроны и ионы быстро передают тепло на стенки сосуда, в результате температура

плазмы понижается и начинается рекомбинация. Значит, чтобы сохранить плазму постоянной, надо постоянно передавать извне количество теплоты или изолировать ее от стенки установки.

Если плазму поместить в магнитное поле, то электроны и ионы будут двигаться по траектории, похожими на острие плазмы. И здесь электрон движется в одном направлении, а ионы в противоположном ему направлении.

Если создать магнитное поле, чтобы силовые линии со всех сторон окружали плазму, т.е. они выполняли бы роль сетки, была бы решена задача теплопередачи плазмой. На самом деле это очень сложная проблема, ее решение связано с проблемой управления термоядерным синтезом.

**Применение плазмы.** Одна из областей применения плазмы — это управление термоядерным синтезом, которое могло бы обеспечить человечество неисчерпаемым источником энергии. В 1969 году в Институте атомной энергии имени И. Курчатова была создана установка «Токамак». Там с использованием плазмы были получены первые признаки термоядерной реакции. Но в этой области еще надо проводить множество исследований.

Еще одна перспективная область применения плазмы — это использование ее в магнитогидродинамических генераторах (сокращенно МГД-генератор) — установках для непосредственного преобразования внутренней энергии газа в электрическую энергию. Принцип работы МГД-генератора приведен на рисунке 139. Поток высокотемпературной плазмы направляется в сильное магнитное поле (направляется перпендикулярно плоскости рисунка). Магнитное поле делит плазму на две составляющие: поток положительных и отрицательных частиц. Они переходят на разные пластинки и создают разность потенциалов. Плазму применяют в газовых лазерах, используют для резки и сварки металлов, для создания покрытий.

**Плазма и космос.** Все звезды, в частности Солнце, атмосферы звезд, туманности в галактике и межзвездная среда состоят из плазмы — четвертого состояния вещества. Земля тоже окружена оболочкой из плазмы — ионосферой. Магнитные бури и полярное сияние зависят от окружающей Землю плазмы. Отражение радиоволн от плазмы ионосферы позволяет устанавливать радиосвязь на Земле на далекие расстояния.

Изучение физики плазмы имеет важное значение для изучения процессов, происходящих в космосе, так как во всех точках Солнечной системы существуют «солнечные ветры», иногда они бывают настолько сильными, что представляют определенную угрозу космическим аппаратам.

В заключение можно сказать, что успехи физики плазмы могут найти очень широкое применение в технике.



#### Вопросы для самопроверки

1. Что называют плазмой?
2. На основании чего можно считать плазму электронейтральной?
3. Чему равна плотность объемного заряда в плазме?
4. Какими свойствами плазма отличается от нейтрального газа?
5. Оказывают ли действие электрическое и магнитное поле на плазму?
6. Проводит ли плазма электрический ток?
7. Какое влияние оказывает на электропроводность плазмы повышение температуры? Объясните почему.
8. Проводит ли плазма тепло?
9. Что нужно сделать, чтобы сохранить плазму постоянной?
10. Почему в плазме начинается процесс рекомбинации?
11. Расскажите о применении плазмы в термоядерном синтезе.
12. В каких целях используется магнитогидродинамический генератор?
13. В чем заключается принцип работы магнитогидродинамического генератора?
14. Где еще используется плазма?
15. Имеется ли в космосе плазма?
16. Имеют ли отношение к плазме магнитные бури и полярное сияние?
17. Имеется ли плазма в ионосфере?
18. Какое значение имеет плазма при дальних радиопередачах на Земле?



#### § 85. Электрический ток в электролитах. Электролитическая диссоциация. Электролиз

**Содержание:** электрический ток в электролитах; электролитическая диссоциация; степень диссоциации; электролиз.

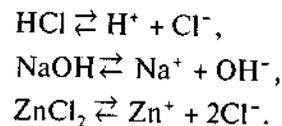
**Электрический ток в электролитах.** Дистиллированная вода не пропускает электрический ток. Если в нее положить немного соли, то она превращается в проводник электрического тока. Значит, водные растворы некоторых веществ обладают свойством проводить электрический ток, т.е. будут иметь носителей заряда. Вещества, разделяющиеся на ионы при растворении в растворителях, называют *электролитами*. Носителями зарядов в

электролитах являются ионы. Поэтому такую проводимость называют ионной проводимостью. Причина появления ионов заключается в том, что, когда электролит растворяется, его молекулы под действием электрического поля молекул растворителя распадаются на положительно и отрицательно заряженные ионы.

Упорядоченное движение ионов в электролитах под действием внешнего электрического поля называют электрическим током в электролитах.

**Электролитическая диссоциация.** Разделение молекул растворенного электролита на положительно и отрицательно заряженные ионы называют *электролитической диссоциацией*. В результате в растворе образуются положительные ионы (катионы) и отрицательные ионы (анионы). Обычно катионами являются ионы металла и водорода, анионами же — кислотные остатки и гидроксильные группы.

Процесс диссоциации записывается следующим образом:



Стрелка, смотрящая вправо, показывает диссоциацию, а стрелка смотрящая влево — рекомбинацию, т.е. воссоединение ионов разных знаков и образование нейтральной молекулы.

**Степень диссоциации.** С целью оценки диссоциации вещества вводится понятие степени диссоциации. *Степенью диссоциации*  $\alpha$  называют отношение числа диссоциированных молекул  $n_0$  к полному числу молекул  $n$  в веществе:

$$\alpha = \frac{n_0}{n}. \quad (85.1)$$

В зависимости от значения  $\alpha$ , вещества делятся на сильные электролиты ( $\alpha \approx 1$ ) и слабые ( $\alpha$  близко к нулю). К сильным электролитам относятся соли, некоторые органические кислоты и их основания, к слабым — минералы.

Степень диссоциации зависит также от природы растворителя, температуры, давления и в особенности от диэлектрической проницаемости растворителя. Чем больше будет диэлектрическая проницаемость, тем меньше будет сила взаимодействия между ионами, образующими молекулу, и, согласно закону Кулона, тем легче разорвать внутренние молекулярные связи. Степень диссоциации также зависит от концентрации растворителя и температуры. С повышением температуры растет кинетическая энергия молекул, это же повышает вероятность столкновения молекул и их ионизацию.

**Электролиз.** При отсутствии внешнего электрического поля разноименные ионы и молекулы совершают хаотичное движение. Если теперь на электролит действует электрическое поле, движение ионов становится упорядоченным. Ток в электролитах можно создать, опустив в них электроды и соединив их проводами с источником тока (рис. 140).

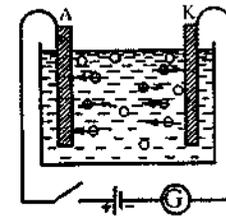


Рис. 140

Под действием электрического поля катионы движутся к отрицательному электроду катоду (К), анионы же движутся к положительному электроду аноду (А). Следует отметить, что скорость движения ионов очень маленькая (например, при  $E = 10^2$  В/м скорость движения ионов водорода равна  $v \approx 3,3 \cdot 10^{-5}$  м/с). В результате в электролитах начинается упорядоченное движение заряженных частиц, т.е. появляется электрический ток. Сила тока равна отношению заряда (обоих знаков), протекающего через определенное сечение электролита на время. Плотность электрического тока определяется согласно закону Ома:

$$J = \frac{E}{\rho}, \quad (85.2)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление электролита. В отличие от металлов удельное сопротивление электролитов с повышением температуры уменьшается, а удельная проводимость — повышается.

При протекании электрического тока через электролит происходит процесс электролиза.

Выделение вещества на электродах при прохождении электрического тока через электролит называется *электролизом*.

Так какхождение тока через электролит сопровождается перемещением вещества, то такой проводник называется проводником второго рода.



#### Вопросы для самопроверки

1. Что называют электролитом? 2. Какие частицы являются носителями зарядов в электролитах? 3. Как возникают ионы в электролитах? 4. Что называют электрическим током в электролитах? 5. Что называют электролитической диссоциацией? 6. Что такое катионы и анионы? Почему они так называются? 7. Как пишется процесс диссоциации? 8. Для чего вводится понятие степени диссоциации? 9. Что называют степенью диссоциации? 10. На какие виды делятся электролиты в зависимости от степени диссоциации? 11. От чего зависит степень диссоциации? 12. Как воздействует на ионы внешнее электрическое поле? 13. Какова скорость ионов в электролитах? 14. Как определяется сила тока в электролитах? 15. Какова плотность электрического тока?

16. Зависит ли удельное сопротивление электролита от температуры? 17. Как объяснить уменьшение удельного сопротивления электролита с повышением температуры? 18. Что называют электролизом? 19. Что называют электродом?



**Содержание:** первый закон Фарадея; физический смысл первого закона; второй закон Фарадея; электрохимический эквивалент.

**Первый закон Фарадея.** В 1833 году М. Фарадей установил законы электролиза. Первый закон Фарадея: масса вещества  $m$ , выделившаяся на электроде, пропорциональна величине заряда  $q$ , протекшего через электролит:

$$\text{или} \quad m = kq \quad (86.1)$$

$$m = kIt, \quad (86.2)$$

где  $I = \frac{q}{t}$  — сила постоянного тока, прошедшего через электролит за время  $t$ .

**Физический смысл первого закона.** Чтобы понять физический смысл первого закона Фарадея, подробнее изучим механизм электролиза и ионной проводимости. Чем больше зарядов проходит через электролит, тем больше ионов достигают электродов. Положительные ионы, достигнув катода, присоединяют к себе избыточные электроны катода и превращаются в нейтральные атомы и оседают на катоде. Отрицательные ионы, достигнув анода, отдают аноду лишние электроны и тоже превращаются в нейтральные атомы и оседают на аноде. Ионы, оседающие на электродах, приносят с собой какое-то количество электрического заряда, значит, полный заряд всех ионов равен числу ионов, осевших на электродах, т.е. пропорционален массе вещества.

**Электрохимический эквивалент.** Коэффициент пропорциональности  $k$  в выражении (86.1) называют электрохимическим эквивалентом. Он равен отношению массы выделившегося на электроде вещества к количеству заряда, протекшего через электролит.

Таблица 9

Электрохимические эквиваленты некоторых веществ

Вещество	$k, 10^{-6} \text{ кг/Кл}$
Серебро	1,118
Водород	0,01045
Медь	0,3294
Цинк	0,0388

**Второй закон Фарадея.** Электрохимический эквивалент вещества прямо пропорционален отношению атомной (молекулярной) массы  $A$  к валентности  $n$ :

$$k = \frac{1}{F} \frac{A}{n}. \quad (86.3)$$

Отношение атомной (молекулярной) массы к валентности называют *химическим эквивалентом*.

$F$  в выражении (86.3) называют *постоянной Фарадея*. Чтобы определить ее физический смысл (86.3), подставим в (86.1):

$$m = \frac{1}{F} \frac{A}{n} q. \quad (86.4)$$

Выражения (86.4) называют обобщенным законом Фарадея.

Постоянная Фарадея показывает, какое количество заряда должно пройти через электролит, чтобы масса выделившегося на электроде вещества была равна его химическому эквиваленту. Опытным путем установлено, что  $F = 9,648 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$ .



#### Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте первый закон Фарадея.
2. В чем заключается физический смысл первого закона?
3. К какому электроду движутся положительные ионы и почему?
4. А отрицательные ионы?
5. Какой процесс происходит на электродах?
6. Что показывает электрохимический эквивалент?
7. Почему у различных веществ электрохимические эквиваленты разные?
8. Сформулируйте второй закон Фарадея.
9. Сформулируйте объединенный закон Фарадея для электролиза.
10. Какой физический смысл постоянной Фарадея?
11. Чему равна постоянная Фарадея?



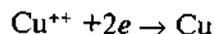
#### § 87. Применение электролиза в технике

**Содержание:** выделение чистых веществ; гальванотехника.

**Выделение чистых веществ.** Явление электролиза широко применяется в технике и в промышленности. Этим методом можно выделить чистые вещества: железо, марганец, хром, цинк, хлор, фтор и другие вещества. Например, перед тем как выделить чистую медь из раствора сульфата меди (медного купороса), происходит диссоциация:



Затем катионы меди под действием электрического поля начинают двигаться в сторону катода и там нейтрализуясь образуют атом меди:



**Гальванотехника.** Электролитический способ покрытия металлических деталей и изделий слоем другого металла, не поддающегося окислению, — *гальванотехника* — тоже широко применяется в промышленности. Поверхности предметов, изготовленных из легко окисляющихся металлов, покрываются трудно окисляющимися металлами, такими как никель, серебро, цинк и др. **Никелированные изделия:** самовар, чайник, нож, ложки, вилки изготавливают таким способом.

Покрытие поверхности предметов неокисляющимися металлами, называют *гальваностегией*. Этот метод самый удобный, дешевый и быстрый.

Например, предмет, который нужно покрыть никелем, тщательно очищают и помещают в ванну, в которую наливают аммиачный раствор вторичной соли никеля. Если в качестве анода взять кусочек никеля, то катодом служит сам предмет. Пропуская в течение некоторого времени электрический ток, покрывают предмет слоем никеля нужной толщины.

При покрытии предмета серебром или золотом используют растворы солей серебра или золота. Электролитическое осаждение металла на поверхность предмета для воспроизведения его формы называется *гальванопластикой*. Гальванопластика была изобретена в 1837 году русским физиком Б.С. Якоби и быстро получила широкое применение в промышленности.

Она используется для изготовления различных барельефов (резьба), копий скульптур, используется при изготовлении клише для выпуска кредитных карточек и других бумаг.



#### Вопросы для самопроверки

1. Как применяется явление электролиза? 2. Как можно выделить чистую медь? 3. Что называют гальванотехникой? 4. Приведите примеры применения гальванотехники. 5. Что называют гальваностегией? В чем сущность этого метода? 6. Почему при гальваностегии предмет используется в качестве катода? 7. Как осуществляется покрытие предметов золотом или серебром? 8. Что называют гальванопластикой и кто ее изобрел? 9. Где применяется гальванопластика?



**Содержание:** гальванические элементы; строение гальванического элемента; поляризация электродов и их устранение; аккумуляторы; КПД аккумулятора и его емкость.

**Гальванические элементы.** Если в раствор опустить металлический электрод, то отрицательные ионы электрода подходят к поверхности металла и вырывают положительные ионы из кристаллической решетки. Вместе с этим происходит и обратный процесс оседания ионов металла на электроде. Будет очень хорошо, если катионы электролита являются ионами металла электрода. Например, для раствора  $\text{CuSO}_4$  электродом служит медь.

В результате перехода ионов металла в раствор, металл заряжается отрицательно, а раствор — положительно, т.е. возникает электрическое поле, направленное из раствора в металл, и оно препятствует растворению металла. Если сначала произойдет обратный процесс, т.е. оседание ионов раствора на электроде будет происходить быстрее, то тогда электрод зарядится положительно.

В обоих случаях разность потенциалов, появившаяся между металлом и раствором, уравнивает скорость растворения и кристаллизации электрода. Эту разность потенциалов называют *электролитическим потенциалом* данного металла в данном растворе.

Если в электролит опустить два электрода, изготовленных из различных металлов, то возникает разность потенциалов, равная разности их электролитических потенциалов. Таким образом, химическая энергия взаимодействия металла и электролита превращается в энергию электрического поля.

Устройство, непосредственно превращающее энергию химической реакции в электрическую энергию, называют *гальваническим элементом*.

**Строение гальванических элементов.** Основанием для строения гальванического элемента служит взаимодействие между металлом и электролитом, возбуждающим электрический ток в замкнутой цепи. Так как это явление было открыто в конце XVIII века итальянским ученым Л. Гальвани (1737 — 1798), новые источники тока назвали в его честь гальваническими элементами. Гальванические элементы состоят из двух электродов, изготовленных из различных металлов и опущенных в электролит.

Итальянский физик А. Вольта (1745—1827) изготовил первый гальванический элемент, опустив в серную кислоту пластинки из меди и цинка. ЭДС элемента Вольта была равна 1,1 В. При работе элемента Вольта на ее положительном полюсе выделяется водород, а на отрицательном происходит растворение цинка (рис. 141).

На практике больше используются другие элементы, отличающиеся от элемента Вольта электродами и элект-

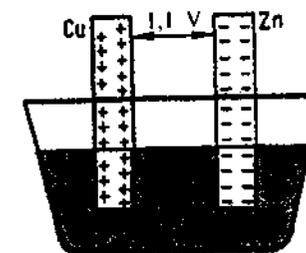


Рис. 141

тролитами. Например, в элементе Даниэла с ЭДС 1,09 В положительным электродом является медь, опущенная в медный купорос, отрицательным электродом является цинк, опущенный в цинковый купорос или в серную кислоту.

У большинства гальванических элементов при длительной эксплуатации понижается ЭДС и прекращается подача тока. Причиной этому является поляризация электродов.

**Поляризация электродов и их устранение.** В принципе работы элемента Вольта имеется большой недостаток. Водород, выделяющийся на медном электроде, через некоторое время окружает электрод и препятствует подходу новых ионов водорода. В результате изменяется электролитический потенциал электродов, и значит, изменяется и их разность. Этот процесс называют *поляризацией электродов*. Поляризация электродов как бы создает в элементе противоположную ЭДС и уменьшает в нем ток. Для устранения поляризации элементов вводится вещество, соединяющееся с выделяющимся газом, т.е. окисляющее вещество. Такие окислители называют устраняющими поляризацию, а элементы, устраняющие поляризацию, — неполяризуемыми. Они работают значительно дольше. Хотя существует много видов неполяризуемых элементов, но принцип их работы одинаковый. Самым распространенным из них является элемент Лекланше, его ЭДС равна 1,5 В.

**Аккумуляторы.** Гальванические элементы работают до тех пор, пока полностью не израсходуют имеющуюся в них химическую энергию (например, в элементе Лекланше пока не растворится цинк). Затем перестают работать. Поэтому иногда используются гальванические элементы, у которых путем электролиза можно восстановить химическую энергию, необходимую для их работы.

Такие элементы называют аккумуляторами, а процесс накопления химической энергии при помощи электролиза — зарядкой аккумуляторов (накапливание энергии).

При зарядке аккумуляторов ток из внешнего источника подается против тока аккумулятора.

В технике используются два типа аккумуляторов: кислотные и щелочные. Кислотные аккумуляторы состоят из свинцовых пластин, опущенных в серную кислоту. Отрицательный электрод изготавливается из чистого свинца, поверхность его мягкая, а положительный электрод покрывается двуокисью свинца. При разрядке аккумулятора обе пластинки медленно покрываются серноокислотным свинцом. При зарядке аккумулятора разница между положительными и отрицательными электродами восстанавливается. ЭДС кислотных аккумуляторов бывает около 2 В.

Щелочные аккумуляторы состоят из никель-железных пластин с кармашками. В кармашек положительной пластинки помещают окись никеля, а в кармашек отрицательной пластинки — окись железа. Роль электролита выполняет щелочь калия. ЭДС щелочных аккумуляторов бывает около 1,4 В. Щелочные аккумуляторы по сравнению с кислотными удобные и легкие, не выделяют вредных газов и паров, при кратковременном коротком замыкании не выходят из строя.

**КПД аккумуляторов и их емкость.** КПД аккумуляторов называют величину, показывающую, какая часть энергии, полученная при зарядке, возвращается при разрядке.

У кислотных аккумуляторов КПД бывает около 80%, у щелочных — около 60%. Каждый аккумулятор характеризуется своей емкостью. Емкость аккумулятора измеряется количеством заряда, которую заряженный аккумулятор отдает при разрядке. Она измеряется не в кулонах, а в специальных единицах — ампер-часах.

Ампер-час — количество заряда, который протекает за 1 час при токе 1А.  $1 \text{ А} \cdot \text{ час} = 3600 \text{ Кл}$ .

Аккумуляторы являются неотъемлемой частью автомобилей, самолетов, подводных лодок, осветителей поезда.

Гальванические элементы же широко применяются в радиоприемниках и телевизорах, телефонах и телеграфных устройствах.

Вместе с этим они отравляют атмосферу окисью углерода, окисью азота, углеводородами и другими соединениями. Поэтому сейчас большое внимание уделяется производству автомобилей, использующих солнечную энергию.

#### | Г р § Вопросы для самопроверки

1. Какой потенциал называют электролитическим потенциалом?
2. Какое устройство называют гальваническим элементом?
3. Каково устройство гальванических элементов?
4. Кто изобрел гальванические элементы?
5. Каково устройство элемента Вольта и его ЭДС?
6. Каково устройство элемента Даниэла и его ЭДС?
7. Почему уменьшается ЭДС гальванических элементов?
8. Что называют поляризацией электродов?
9. К каким последствиям приводит поляризация электродов?
10. Что делается для предотвращения поляризации электродов?
11. Поляризуется ли элемент Лекланше? Чему равна его ЭДС?
12. Сколько времени служат гальванические элементы?
13. Что называют аккумуляторами?
14. Какой процесс называют зарядкой аккумуляторов?
15. Как соединяется внешний источник при зарядке аккумулятора?
16. Какие виды аккумуляторов существуют?
17. Каково устройство кислотных аккумуляторов; принцип работы и его ЭДС?
18. Каково устройство щелочных аккумуляторов; принцип работы и ЭДС?
19. В чем преимущества щелоч-

ных аккумуляторов? 20. Как определяется КПД аккумуляторов? 21. Чему равен КПД аккумуляторов? 22. Что показывает емкость аккумуляторов? 23. Скольким кулонам равен один ампер-час? 24. Где применяются гальванические элементы? Приведите примеры. 25. В чем заключаются вредные стороны гальванических элементов?

## § 89. Строение полупроводников

**Содержание:** строение атома; строение полупроводников.

**Строение атома.** По своим электропроводным свойствам твердые тела делятся на проводники, полупроводники и изоляторы. Причина отличия их друг от друга заключается в различии их атомных электронных оболочек.

Известно, что атом любого элемента состоит из ядра и вращающихся вокруг ядра электронов. Ядро состоит из положительно заряженных протонов и электронейтральных нейтронов. Заряд ядра  $Z$  определяется числом протонов и соответствует порядковому номеру элемента в периодической системе Менделеева. Число электронов, вращающихся по замкнутым орбитам вокруг ядра, тоже равно  $Z$ , и поэтому атом электронейтрален. Электроны в атоме располагаются по известным  $n=1, n=2, n=3$  орбитам (оболочкам). На каждой орбите может находиться  $2n^2$  электронов и их энергии тоже одинаковые. Энергии электронов в каждой оболочке соответственно  $E_1, E_2, E_3, \dots$ .

Между орбитами существует запрещенная зона  $\Delta E$ , ее ширина определяется разностью энергий, которые электрон имеет на орбитах:

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

**Строение полупроводников.** Для примера возьмем типичный полупроводник германий. Его порядковый номер 32 и он имеет 4 электронные оболочки. В 1-й оболочке имеется 2 электрона; во 2-й оболочке — 8; в 3-й оболочке — 18; в 4-й оболочке — 4 (рис. 142). Электроны, расположенные в трех внутренних оболочках, являются стабильными и в химических реакциях не участвуют. Электроны последней четвертой оболочки слабо связаны с атомом.

Именно эти электроны показывают число других атомов, с которыми элемент может образовать химическую связь, определяет валентность данного элемента. Поэтому электроны внешней

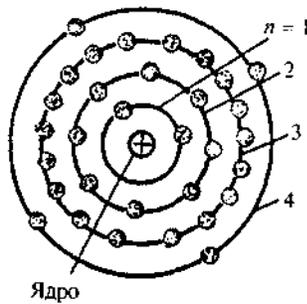


Рис. 142

оболочки называют внешними, или валентными. Германий, у которого во внешней оболочке имеется четыре электрона, является четырехвалентным. При приближении к этому атому других атомов валентные электроны легко взаимодействуют с валентными электронами другого атома и образуют химическую связь.

Если атомной оболочке сообщить определенную энергию, происходит ионизация атома. Именно для удаления электрона из последней оболочки тратится наименьшая энергия.

Германий, кремний и некоторые представители полупроводников считаются кристаллическими веществами. Их атомы располагаются в соответствии с определенными закономерностями.



### Вопросы для самопроверки

1. В чем причина отличия проводников, полупроводников и диэлектриков друг от друга? 2. Каково строение атома? 3. Каково строение атомного ядра? 4. Что показывает число протонов в атоме? 5. А число электронов в атоме? 6. Как распределены по орбитам электроны атома? 7. Чему равна энергия электронов в каждой оболочке? 8. Что показывает запрещенный энергетический уровень? 9. Каково строение полупроводников? 10. Как определяется валентность элемента?



### § 90. Собственная проводимость полупроводников, ее зависимость от температуры и освещенности

**Содержание:** собственная проводимость;  $n$ - и  $p$ -типы проводимости; примесная проводимость; донорная примесь; акцепторная примесь; зависимость проводимости полупроводников от температуры и освещенности.

**Собственная проводимость.** Как было отмечено выше, электропроводность полупроводников ниже, чем у металлов, но выше чем у диэлектриков. В природе полупроводники существуют в виде элементов и химических соединений. По этому признаку различают собственные и примесные полупроводники. Химически чистые полупроводники являются собственными полупроводниками, а их проводимость называется собственной проводимостью. К ним относятся германий — Ge, селен — Se и некоторые химические соединения. При 0K и отсутствии других внешних факторов собственные полупроводники ведут себя как диэлектрики.



Рис. 143

**Проводимость л-типа.** При повышении температуры электроны с верхних уровней валентной зоны скачком переходят на нижние уровни зоны проводимости (рис. 143). При наложении на кристалл электрического поля они перемещаются против поля и создают электрический ток. Проводимость собственных полупроводников, обусловленную электронами, называют *электронной проводимостью*, или проводимостью *n*- типа (от лат. negative — отрицательный).

**Проводимость/ытипа.** Когда электроны скачком переходят в зону проводимости, в валентной зоне возникают вакантные состояния (дырки). Под действием внешнего электрического поля на освободившееся место от электрона (дырку) может переместиться электрон из соседнего уровня. Тогда дырка появится в том месте, откуда ушел электрон. Такой процесс заполнения дырок электронами равносителен перемещению дырки в направлении, противоположном движению электрона, так как если бы дырка обладала положительным зарядом, равным по величине заряду электрона. Проводимость собственных полупроводников, обусловленная квазичастицами — дырками, — называется *дырочной проводимостью*, или проводимостью *p*-типа (от лат. positive — положительный).

В химически чистых полупроводниках число электронов в зоне проводимости равно числу дырок в валентной зоне и они оба участвуют в создании электрического тока. Но вместе с этим так как подвижность электронов выше подвижности дырок, то дырочный ток не сможет быть равен половине полного тока. Вся равноудельная проводимость полупроводников будет равна сумме электронной и дырочной проводимости. Так как носители зарядов, т. е. электроны и дырки, являются собственными носителями зарядов, то и проводимость, созданная ими, называется собственной проводимостью.

**Примесная проводимость.** Как было отмечено выше, проводимость полупроводников зависит от концентрации и подвижности электронов и дырок. Поэтому любыми способами стараются увеличить число носителей заряда в полупроводниках. Один из таких способов — это введение примеси. Во многие полупроводники вводят примеси и улучшают их электропроводимость. Примеси могут быть двух типов: донорная и акцепторная.

**Донорная примесь.** Если в кристаллическую решетку четырехвалентного германия ввести атомы пятивалентного мышьяка, сурьмы или похожие на них вещества в качестве примеси, то концентрация электронов резко возрастает. Причиной этому является то, что четыре электрона атома примеси участвуют в образовании химической связи с четырьмя электронами германия, а пятый электрон оказывается лишним. В результате он бу-

дет слабо связан со своим атомом и может быть отщеплен от атома и стать «свободным» электроном (рис. 144). Таким образом, в этом случае примесные атомы отдают свой электрон, т.е. становятся донорами электронов, и поэтому называются *донорной примесью*. В донорной

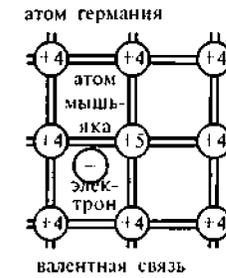


Рис. 144

примеси электрическая проводимость обусловлена движениями свободных электронов, поэтому ее называют *электронной проводимостью*, или проводимостью *n*-типа.

**Акцепторная проводимость.** Если в кристаллическую решетку германия ввести атомы трехвалентного индия, галлия или похожие на них вещества в качестве примесей, то характер проводимости полупроводника изменится. Причиной этому будет то, что для организации парноэлектронной связи с атомом германия у индия не хватает одного электрона. Другими словами, между этими атомами возникает незаполненная валентная связь, т.е. образуется дырка, и поэтому примесь называют *акцепторной примесью* (рис. 145). Число дырок в этом случае в кристалле будет равно числу атомов примеси. В акцепторной примеси электрическая проводимость обусловлена движением дырок, и ее называют дырочной проводимостью, или проводимостью *p*-типа.

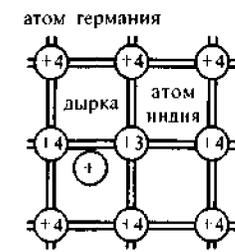


Рис. 145

**Зависимость проводимости полупроводников от температуры.** Нам известно, что с повышением температуры электрическая проводимость металлов ухудшается, что связано с ухудшением подвижности электронов из-за увеличения числа столкновений с молекулами.

В полупроводниках с повышением температуры так же, как и в металлах, ухудшается подвижность электронов и дырок, но она не играет существенной роли, так как при нагревании полупроводников растет кинетическая энергия валентных электронов и они переходят через запрещенную зону. В результате увеличивается число свободных электронов и электрическая проводимость полупроводников улучшается.

Вместе с этим, при низких температурах увеличивается разница между металлами и полупроводниками, так как проводимость полупроводников ухудшается. Значит, при низких температурах полупроводники становятся похожими на диэлектрики и разница между ними уменьшается.

**Зависимость проводимости полупроводников от освещенности.** При освещении полупроводников электрическая проводимость улучшается. Причина этому — появление новых носителей заряда под действием света. Они могут появиться при следующих процессах:

1) свет с достаточно большой энергией переводит электрон из валентной зоны в зону проводимости. В результате увеличивается число электронов и дырок, т.е. улучшается собственная проводимость полупроводника;

2) свет, освещая донорную примесь, переводит электрон в зону проводимости и увеличивает число свободных электронов;

3) свет, освещая акцепторную примесь, переводит электрон из валентной зоны на акцепторные уровни и в валентной зоне увеличивается число дырок.



### Вопросы для самопроверки

1. Какие полупроводники называют собственными полупроводниками? Приведите примеры.
2. Какую проводимость называют собственной проводимостью?
3. Как себя ведут собственные полупроводники при 0К?
4. Какую проводимость называют проводимостью  $n$ -типа?
6. Какую проводимость называют проводимостью  $p$ -типа?
7. Как образуется проводимость  $p$ -типа?
8. Какую проводимость называют примесной проводимостью?
9. С какой целью в полупроводник вводятся примеси?
10. Сколько видов примесей может быть?
11. Какие примеси называют донорными?
12. Какую проводимость образует донорная примесь?
13. Какую примесь называют акцепторной примесью?
14. Какую проводимость образует акцепторная примесь?
15. Как изменится проводимость полупроводника с повышением температуры?
16. Объясните механизм улучшения проводимости полупроводников с повышением температуры.
17. Объясните механизм ухудшения проводимости с понижением температуры.
18. Изменяется ли проводимость полупроводников под действием света?
19. Как действует свет на собственные полупроводники?
20. Как действует свет на примесные полупроводники?



Содержание: диод и триод; значение полупроводниковых приборов.

**Диод.** Односторонняя проводимость контакта двух полупроводников используется для выпрямления переменного тока. Полупроводниковое устройство, содержащее один  $p$ - $n$ -переход, называется *полупроводниковым диодом*. Для понимания принципа работы диода изучим  $p$ - $n$ -контакт (рис.146 а). Если привести в

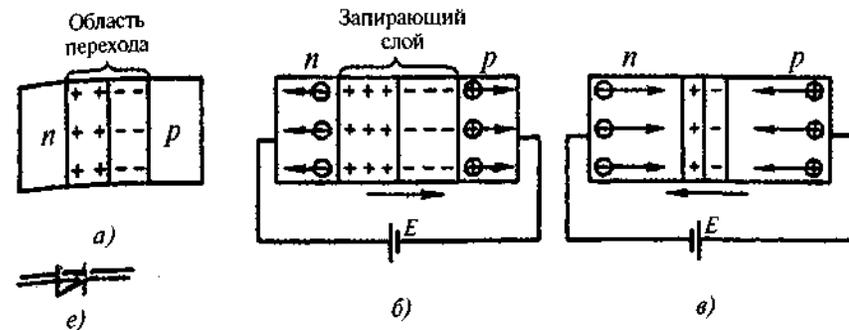


Рис. 146

контакт полупроводники с  $p$ - и  $n$ -проводимостью, произойдет переход (диффузия) из  $n$ -области, где больше электронов в  $p$ -область электронов и из  $p$ -области, где больше дырок, в  $n$ -область дырок.

В результате между ними образуется контактная разность потенциалов. Электроны и дырки на границе полупроводников создают запирающий потенциал, препятствующий дальнейшей диффузии. Теперь к системе приложим внешнее электрическое поле, т.е. подключим источник тока, как показано на рисунке 146 б. Пусть напряженность внешнего поля совпадает с направлением поля запирающего слоя. В результате электроны будут двигаться против поля, а дырки двигаться по полю, и удаляться от граничного слоя. Запирающий слой будет расширяться, его ширина будет зависеть от приложенной разности потенциалов. Так как в запирающем слое число электронов и дырок мало, он ведет себя как диэлектрик и в результате через  $p$ - $n$ -переход ток не идет.

Направление внешнего поля, расширяющего запирающий слой, называют *запирающим*, или *обратным переходом*.

Теперь направление тока изменим, как показано на рисунке 146 в. Направление движения электронов и дырок изменится. В зоне  $p$ - $n$ -перехода они рекомбинируют, т.е. нейтрализуют друг друга, и в результате запирающий слой сужается и его сопротивление уменьшается. Значит, в этом направлении, т.е. из  $p$ -полупроводника в сторону  $n$ -полупроводника идет ток. Поэтому это направление называется *проводящим*, или *прямым*. Таким образом,  $p$ - $n$ -переход имеет одностороннюю проводимость, такой полупроводниковый диод используется в качестве выпрямителя и его условное обозначение приводится на рисунке 146 г. Полупроводниковый диод обладает целым рядом преимуществ по сравнению с электронными лампами, они удобные, надежные и имеют малые габаритные размеры, поэтому диоды полностью

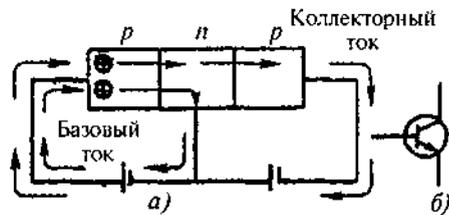


Рис. 147

водниковый триод-транзистор, необходимы три составные части примесного полупроводникового материала (поэтому он и называется триодом): два *n*-типа и один *p*-типа или наоборот. На рисунке 147 *a* приведен транзистор *p-n-p*-типа. При соединении транзистора в цепь используются две батареи. Положительный полюс одного из них соединяется с эмиттером (*э*) *p*-части, отрицательный полюс соединяется с базой (*б*) средней *n*-части. Положительный полюс второго источника соединяется с базой, отрицательный, называемый коллектором (*к*), — со второй *p*-частью. При таком соединении дырки из эмиттера переходят на базу, дальнейшее их движение из базы в сторону коллектора происходит под действием второй батареи. При возрастании напряжения первой батареи возрастает число дырок в эмиттере, которые идут через базу к коллектору. Значит, как и в ламповом триоде, напряжение между сеткой и катодом управляет анодным током, так в транзисторе напряжение между базой и эмиттером управляет током коллектора. На рисунке 147 *б* приведено условное обозначение триода. Полупроводниковые триоды используются в качестве усилителей и генераторов.

**Значение полупроводниковых приборов.** Появление полупроводниковых приборов совершило подлинную революцию в радиотехнике. Их простота и малые размеры позволяют организовать непрерывное производство в качестве микромодулей. Микромодули имеют вид тонкой бумаги, в них пропечатываются диоды, триоды, сопротивления и другие элементы радиоустановок.

Составив различные комбинации микромодулей, можно изготавливать радиоустановки с заранее заданными параметрами. В настоящее время не существует приборов, где бы ни использовались полупроводниковые диоды, триоды, резисторы. При помощи термистора (терморезистора) можно сделать детектор, измеряющий температуру, прибор, регистрирующий элементарные частицы, фоторезистор, измеряющий энергию света. Все космические корабли снабжены полупроводниковыми солнечными батареями, преобразующими солнечную энергию в электрическую, в медицине используются миниатюрные датчики,

вытеснили электронные лампы из радиотехники. Полупроводниковые диоды используются не только как выпрямители, но применяются в качестве детекторов.

**Транзистор. Триод.** Что-

бы изготовить полупроводниковый триод-транзистор, необходимы три составные части примесного полупроводникового материала (поэтому он и называется триодом): два *n*-типа и один *p*-типа или наоборот. На рисунке 147 *a* приведен транзистор *p-n-p*-типа. При соединении транзистора в цепь используются две батареи. Положительный полюс одного из них соединяется с эмиттером (*э*) *p*-части, отрицательный полюс соединяется с базой (*б*) средней *n*-части. Положительный полюс второго источника соединяется с базой, отрицательный, называемый коллектором (*к*), — со второй *p*-частью. При таком соединении дырки из эмиттера переходят на базу, дальнейшее их движение из базы в сторону коллектора происходит под действием второй батареи. При возрастании напряжения первой батареи возрастает число дырок в эмиттере, которые идут через базу к коллектору. Значит, как и в ламповом триоде, напряжение между сеткой и катодом управляет анодным током, так в транзисторе напряжение между базой и эмиттером управляет током коллектора. На рисунке 147 *б* приведено условное обозначение триода. Полупроводниковые триоды используются в качестве усилителей и генераторов.

**Значение полупроводниковых приборов.** Появление полупроводниковых приборов совершило подлинную революцию в радиотехнике. Их простота и малые размеры позволяют организовать непрерывное производство в качестве микромодулей. Микромодули имеют вид тонкой бумаги, в них пропечатываются диоды, триоды, сопротивления и другие элементы радиоустановок.

Составив различные комбинации микромодулей, можно изготавливать радиоустановки с заранее заданными параметрами. В настоящее время не существует приборов, где бы ни использовались полупроводниковые диоды, триоды, резисторы. При помощи термистора (терморезистора) можно сделать детектор, измеряющий температуру, прибор, регистрирующий элементарные частицы, фоторезистор, измеряющий энергию света. Все космические корабли снабжены полупроводниковыми солнечными батареями, преобразующими солнечную энергию в электрическую, в медицине используются миниатюрные датчики,

которые вводятся в органы человека и дают сведения об их состояниях. Эти примеры показывают широту области применения полупроводниковых приборов, однако, перспективы их применения еще более обширны.



### Вопросы для самопроверки

1. Какой прибор называют полупроводниковым диодом? 2. В чем заключается принцип работы полупроводникового диода? 3. Какое направление внешнего поля называют запирающим направлением? 4. Когда запирающий слой расширяется? 5. Когда запирающий слой сужается? 6. Проводит ли полупроводниковый диод ток по обоим направлениям? 7. В чем преимущество полупроводниковых диодов перед ламповыми диодами? 8. Как устроен триод? 9. Чем управляет коллекторный ток в полупроводниковом триоде? 10. Где применяются триоды? 11. В чем преимущества полупроводниковых приборов? 12. Где применяются полупроводники в качестве детекторов? 13. Приведите примеры применения полупроводниковых приборов.



### Примеры решения задач

**Задача 1:** Плотность тока в алюминиевой проволоке  $1 \text{ А/мм}^2$ . Найдите среднюю скорость  $\langle v \rangle$  упорядоченного движения электронов, считая, что число свободных электронов в единице вещества равно числу атомов.

**Дано:**  
 $j = 1 \text{ А/мм}^2 = 10^6 \text{ А/м}^2$ ;  
 $n_e = n_A$ .

---

$\langle v \rangle = ?$

**Решение.** Между плотностью тока и средней скоростью упорядоченного движения электронов существует связь

$$j = e \cdot n \langle v \rangle.$$

Отсюда найдем  $\langle v \rangle$ :

$$\langle v \rangle = \frac{j}{e \cdot n}.$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  — заряд электрона,  $n = n_e = n_A$  — концентрация электронов:

$$n = n_e = n_A = \frac{N_A}{V_m} = \frac{N_A \rho}{M}.$$

Тогда выражение для  $\langle v \rangle$  принимает вид

$$\langle v \rangle = \frac{j \cdot M}{N_A \cdot \rho \cdot e},$$

где  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  — число Авогадро;  $V_m = \frac{M}{\rho}$  — молярный

объем;  $M = 27 \cdot 10^{-3}$  кг/моль — молярная масса алюминия;  $\rho = 2,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> — плотность. Используя значение величин, находим

$$\langle v \rangle = \frac{10^6 \cdot 27 \cdot 10^{-3}}{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 2,7 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \frac{\text{М}}{\text{с}} = 10^{-4} \frac{\text{М}}{\text{с}} = 0,1 \text{ мм/с}.$$

Ответ:  $\langle v \rangle = 0,1$  мм/с.

**Задача 2.** Какую наименьшую скорость должен иметь электрон, чтобы ионизовать атом азота, если потенциал ионизации атома азота равен 14,5В?

**Дано:**

$$u_i = \Delta\varphi = 14,5\text{В};$$

$N_2$ .

$$v_{\min} = ?$$

**Решение.** Чтобы ионизовать атом азота, наименьшая кинетическая энергия электрона должна быть равна работе выхода:

$$E_{\text{к.мин}} = A$$

или

$$\frac{m_e v_{\min}^2}{2} = e \cdot \Delta\varphi = e u_i.$$

Из этого выражение найдем  $v_{\min}$ :

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot u_i}{m_e}},$$

где:  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл — заряд электрона;  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг — масса электрона. При помощи числовых значений величин найдем

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 14,5}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \frac{\text{М}}{\text{с}} = 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{М}}{\text{с}}.$$

Ответ:  $v_{\min} = 2,3 \cdot 10^6$  м/с.



**Задачи для самостоятельного решения:**

1. Найдите среднюю скорость  $\langle v \rangle$  упорядоченного движения электронов в медном проводе сечением 1 мм<sup>2</sup> при силе тока 10 А, считая, что на каждый атом приходится по два электрона проводимости. ( $\langle v \rangle = 3,7$  мкм/с)
2. При протекании тока через медный проводник за каждую секунду выделяется количество теплоты 0,35 Дж. Сколько электронов проходит через поперечное сечение этого проводника, если его длина 2 м, а площадь поперечного сечения 0,4 мм<sup>2</sup>? ( $N = 1,27 \cdot 10^{19}$ )
3. Сколько времени длилось никелирование, если на изделие осел слой никеля массой 1,8 г? Сила тока 2 А. ( $t = 50$  min)

4. В телевизионном кинескопе ускоряющее анодное напряжение равно 16 кВ, а расстояние от анода до экрана составляет 30 см. За какое время электрон проходит это расстояние? ( $t = 4$  нс)

### Тестовые вопросы

1. В результате упорядоченного движения каких электрических зарядов возникает электрический ток в металлах?

- А. Отрицательных и положительных ионов.
- В. Свободных электронов.
- С. Электронов и положительных ионов.
- Д. Положительных и отрицательных ионов, а также свободных электронов.
- Е. Правильного ответа нет.

2. В результате упорядоченного движения каких электрических зарядов возникает электрический ток в газах?

- А. Электрона и положительных ионов.
- В. Положительных и отрицательных ионов.
- С. Положительных, отрицательных ионов и электронов.
- Д. Электронов.
- Е. Правильные ответы А и D.

3. В результате упорядоченного движения каких электрических зарядов возникает электрический ток в жидкостях?

- А. Положительных и отрицательных ионов.
- В. Положительных, отрицательных ионов и электронов.
- С. Свободных электронов.
- Д. Электронов и положительных ионов
- Е. Правильного ответа нет.

4. В результате упорядоченного движения каких электрических зарядов возникает электрический ток в полупроводниках?

- А. Положительных и отрицательных ионов.
- В. Свободных электронов.
- С. Свободных электронов, дырок.
- Д. Положительных, отрицательных ионов и электронов.
- Е. Только дырок.

### Основные выводы

В металлах носителями зарядов являются электроны.

*Работой выхода* называют работу, которую нужно затратить для удаления электрона из металла:  $A = e \cdot \Delta\varphi$ .

$\Delta\varphi$  — потенциал ионизации.

1 эВ — энергия, которую приобретает электрон при прохождении разности потенциалов в 1В:  $1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{Дж}$ .

*Эмиссией* называют процесс испускания электрона из металла.

*Вакуумный диод* представляет собой откаченный баллон, содержащий два электрода: катод и анод.

Если в диод ввести дополнительную сетку, то получается, *триод*. Триод используется в качестве усилителя.

Прохождение электрического тока через газы называется *газовым разрядом*.

*Плазмой* называется сильно ионизованный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы.

Вещество, разделяющееся на ионы в растворителе, называют *электролитом*. В электролитах носителями зарядов являются ионы.

Упорядоченное движение ионов в электролитах под действием внешнего электрического поля называется *электрическим током в электролитах*.

Явлением *электролиза* называется процесс выделения на электродах составляющего вещества при протекании тока в электролите.

*Первый закон Фарадея*: масса вещества, выделившегося на электроде, пропорциональна заряду, протекающему по электролиту:  $m = kq = k \cdot J \cdot t$ .

Гальваническими элементами называются *устройства, превращающие энергию химической реакции в электрическую энергию*.



## ГЛАВА XV. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Датский физик Х. Эрстед (1777—1851) определил, что как вокруг электрического заряда образуется электрическое поле, так вокруг электрического тока образуется своего рода силовое поле. Так как он изучал действия электрического поля тока на магнитную стрелку (1819 г.), то это поле он назвал магнитным. Магнитное поле возникает только вокруг электрического тока (т.е. в результате движения электрических зарядов) и действует на движущиеся электрические заряды и на постоянный магнит. Магнитное поле является особым видом материи и через магнитное поле осуществляется взаимодействие движущихся электрических зарядов или тел, именуемых магнитным моментом.



### § 92. Магнитное поле. Контур с током

**Содержание:** Магнитное поле: существует ли магнитный заряд; контур с током, магнитный момент контура.

**Магнитное поле.** Чтобы изучить возникновение магнитного поля, поднесем магнитную стрелку к проводнику с током. Когда по проводнику ток не течет, стрелка находится в определенном положении, показывая север и юг (рис. 148 а). Если теперь по проводнику потечет ток, то наблюдается изменение положения стрелки (рис. 148 б). Причиной этому может быть только силовое поле, возникающее вокруг проводника с током. Если теперь поменять направление тока, то положение магнитной стрелки тоже поменяется (рис. 148 в).

Это есть результат того, что действие поля вокруг проводника с током поменялось на обратное. Также попробуем пропустить ток через два параллельных проводника. Если токи  $I_1$  и  $I_2$  текут в одном направлении, то проводники притягиваются, если токи

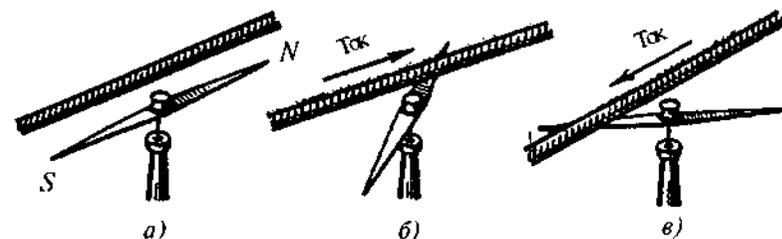


Рис. 148

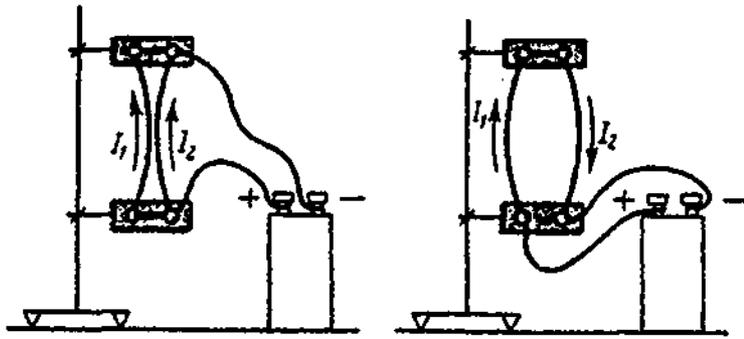


Рис. 149

текут в противоположных направлениях, проводники отталкиваются (рис. 149). Нам известно, что взаимодействие между неподвижными зарядами осуществляется электрическим полем. Тогда возникает вопрос, как осуществляется взаимодействие между проводниками с током.

По выводу французского физика Ампера, электрические токи взаимодействуют друг с другом с силой некулоновского характера.

Взаимодействие между проводниками с током, или между движущимися электрическими зарядами, называют *магнитным взаимодействием*. Силы, с которыми проводники с током действуют друг на друга, называют *магнитными силами*. Причина возникновения магнитных сил — возникающее вокруг проводников с током магнитное поле. Магнитное поле, как и электрическое, — частный случай проявления электромагнитного поля.

Неподвижные заряды не создают магнитное поле. Только движущиеся заряды (электрический ток) и магнетики создают магнитное поле. Поэтому магнит может взаимодействовать только с ними.

**Существует ли магнитный заряд?** Изучение магнитного поля, постоянных магнитов показывает, что они имеют два полюса: северный (англ. North) и южный S (англ. South). Одноименные полюса отталкиваются друг от друга, а разноименные притягиваются. Наличие таких же свойств, как у электрических зарядов, поставило вопрос: существует ли магнитный заряд в магнитном поле? Если бы это было так, то можно было бы разделить отрицательные и положительные заряды, т.е. зарядить тела отрицательно и положительно и отделить северный и южный полюса магнитов. На сколько бы ни делили магнетики, они всегда имеют два полюса. Значит, отделить полюса магнитов друг от друга невозможно, в природе не существует отдельных магнитных зарядов.

Для объяснения существования магнитов Ампер выдвинул следующую гипотезу. По его гипотезе, внутри молекул и атомов

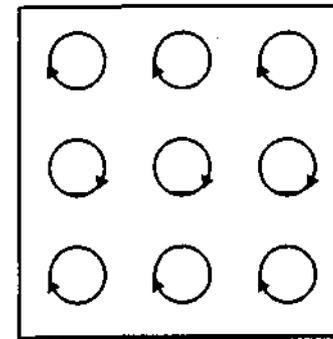


Рис. 150

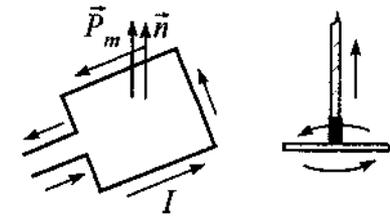


Рис. 151

вещества вращаются элементарные электрические токи и создают элементарное магнитное поле. Если эти токи располагаются относительно друг друга хаотично, то их магнитное поле взаимно компенсируется и тело не имеет никаких магнитных свойств. В магнетиках же элементарные токи, а значит их магнитное поле под внешним воздействием, располагаются в определенном направлении (рис. 150). Значит, магнитное свойство любого тела есть результат существования внутри них элементарных токов. Следовательно, любое магнитное взаимодействие — это взаимодействие токов.

**Контур с током.** Мы вели разговор о значении использования в физике различных моделей. Например, при исследовании электростатического поля рассматривались точечные заряды, которые своим полем не могли изменить изучаемое поле. При исследовании магнитного поля рассматривается замкнутый плоский контур с током (рамка с током), размеры которого малы по сравнению с расстоянием до токов, образующих магнитное поле, и учитывается, что его поле не может изменить изучаемое поле. Ориентация контура в пространстве характеризуется направлением нормали к контуру (рис. 151).

Положительное направление нормали определяется правилом правого буравчика, т.е. если направление нормали  $n$  совпадает с поступательным движением буравчика, направление тока в контуре должно совпадать с направлением движения ручки буравчика.

Как показывают опыты, магнитное поле оказывает на рамку с током (испытательный контур) ориентирующее действие. Если поменять направления тока в контуре на противоположное, то расположение контура поменяется на  $180^\circ$ . Это есть результат того, что магнитное поле имеет определенное направление.

За направление магнитного поля в данной точке принимается направление, вдоль которого располагается положительная нор-

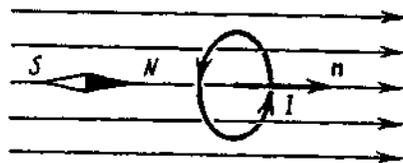


Рис. 152

малы к рамке (рис. 152). Оно совпадает также с направлением силы, которая действует на северный полюс магнитной стрелки, помещенной в данную точку.

**Магнитный момент контура.**

Как было рассмотрено выше, на рамку с током, введенным в магнитное поле, со стороны магнитного поля действует вращающий момент силы  $M$ . Как показывают опыты, для данной точки магнитного поля момент силы, действующий на рамку с током, равен векторному произведению магнитного момента рамки, и вектора магнитной индукции  $B$ , являющейся количественной характеристикой магнитного поля:

$$\vec{M}_{\max} = [\vec{P}_m \cdot \vec{B}]. \quad (92.1)$$

Магнитным моментом контура  $P_m$ , характеризующим магнитные свойства рамки с током и определяющим его поведение во внешнем магнитном поле, называют величину, равную произведению силы тока  $I$ , протекающего по рамке на поверхности контура  $S$ , т. е.

$$\vec{P}_m = I \cdot S \cdot \vec{n}. \quad (92.2)$$

Магнитный момент контура — векторная величина, его направление совпадает с направлением положительной нормали к поверхности рамки (рис 151).



### Вопросы для самопроверки

1. Где возникает магнитное поле? 2. На что оказывает действие магнитное поле? 3. Кто определил возникновение магнитного поля? 4. Является ли материей магнитное поле? 5. Действует ли проводник с током на расположенную рядом магнитную стрелку? 6. А если изменить направление тока в проводнике? 7. Как взаимодействуют два параллельных проводника с током? Зависит ли это взаимодействие от направления токов? 8. Как происходит взаимодействие между проводниками с током? 9. Какое действие называют магнитным? 10. Что называют магнитными силами? 11. Какое поле называется магнитным? 12. Возникает ли магнитное поле вокруг неподвижного заряда? 13. Действует ли магнитное поле на неподвижный заряд? 14. Почему магнитное поле не действует на неподвижный заряд? 15. Какие полюса существуют у постоянных магнитов и как они взаимодействуют? 16. Существуют ли магнитные заряды в природе? 17. Какова гипотеза Ампера о магнитах? 18. Результатом чего согласно этой гипотезе являются магнитные свойства тел? 18. Какой контур называют контуром с током? Как определяется его направление? 19. Что действует на введенный в магнитное поле контур с током? 20. Чему

равны моменты сил, действующих на введенный в магнитное поле контур с током? 21. Как определяется магнитный момент контура с током? 22. Что показывает магнитный момент контура? 23. Как определяется направление магнитного момента контура?

## § 93. Вектор индукции магнитного поля. Напряженность магнитного поля

**Содержание:** магнитная индукция; единица магнитной индукции; линии магнитной индукции; напряженность магнитного поля; магнитная проницаемость среды, индукция магнитного поля и микротоки.

**Магнитная индукция.** Если в данную точку поля поместить рамки с различными магнитными моментами, то на них действуют различные вращающие моменты. Однако их  $M_{\max}/P_m$  для всех контуров одно и то же и поэтому может служить характеристикой магнитного поля, называемого магнитной индукцией.

$$B = \frac{M_{\max}}{P_m} \quad (93.1)$$

Магнитная индукция является векторной величиной и формула (93.1) определяет ее модуль. Для полного определения магнитного поля надо знать величину и направление магнитной индукции для каждой точки поля. Направления вектора индукции магнитного поля совпадает с направлением внешнего магнитного поля.

В общем случае (93.1) вращающий момент  $M$  зависит от расположения контура с током следующим образом:

$$M = B \cdot P_m \cdot \sin \alpha, \quad (93.2)$$

где  $\alpha$  — угол между векторами  $\vec{P}_m$  и  $\vec{B}$  (рис 153).  $M$  достигает своего максимального значения при

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \left( \sin \frac{\pi}{2} = 1 \right).$$

Контур находится в равновесии ( $M = 0$ ) при  $\alpha = 0$ , т. е. когда векторы  $\vec{P}_m$  и  $\vec{B}$  направлены по одной прямой линии.

**Единица магнитной индукции.** Единица магнитной индукции в СИ — тесла. (Тл). Такое название она получила в честь Н. Тесла.

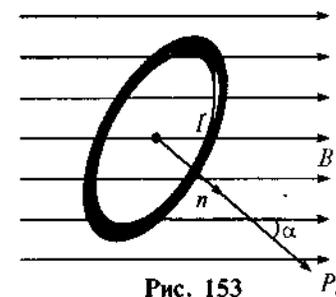


Рис. 153

$$[B] = \frac{[M]}{[P]} = \frac{[H \cdot m]}{[A \cdot m^2]} = 1 \frac{H}{A \cdot m} = 1 \text{ Тл.}$$

1 Тл — это такая индукция магнитного поля, при которой на контур площадью  $1 \text{ м}^2$  при силе тока 1 А действует со стороны поля вращающий момент  $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

**Линии магнитной индукции.** Как электрическое поле можно изобразить графически с помощью силовых линий, так магнитное поле можно изобразить графически с помощью линий магнитной индукции (магнитные силовые линии). Линиями магнитной индукции называют линии, касательные с которыми в каждой точке совпадают с направлением вектора  $\vec{B}$ .

Линии магнитной индукции можно сделать видимыми с помощью мелких железных опилок. К примеру, на стеклянную пластинку, через которую пропущен проводник с током, насыпают тонкий слой железных опилок и слегка встряхивают, опилки располагаются вдоль силовых линий (рис. 154 а).

Из опыта видно, что линии магнитной индукции вокруг прямого тока располагаются по концентрическим окружностям, лежащим на плоскости, перпендикулярной току. Центр окружностей совпадает с осью проводника. Точно таким же образом с помощью железных опилок можно получить изображение линий магнитной индукции проводника с током любой формы (рис. 154 б, в).

Из полученных картин можно сделать следующий вывод.

Линии магнитной индукции всегда замкнуты и охватывают проводники с током. Направление линий вектора магнитной индукции магнитного поля зависит от направления тока в проводнике и задается правилом правого буравчика. Если направление поступательного движения острия правого буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление линий магнитной индукции совпадает с направлением вращения ручки буравчика.

Если вектор магнитной индукции во всех точках поля будет одинаковым ( $\vec{B} = \text{const}$ ), то такое поле называется однородным. Примером однородного поля может быть поле внутри соленоида (рис. 154 в), длина которого во много раз больше диаметра.

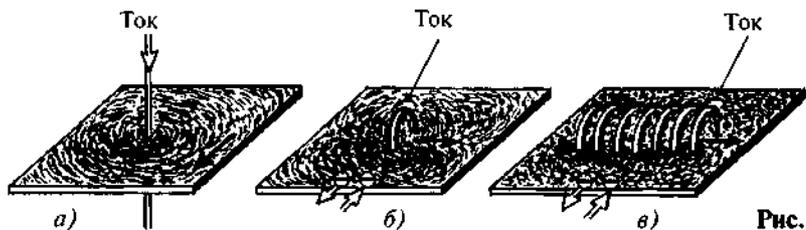


Рис. 154

Плотность линий магнитной индукции выражает значение магнитной индукции  $\vec{B}$ . Например, число линий через единичную поверхность, перпендикулярную линиям магнитной индукции, может быть равно или пропорциональна магнитной индукции в этом месте.

**Магнитная проницаемость среды.** Если с помощью проводника с током создавать магнитное поле в различных веществах и изучать их с помощью контура с током, то магнитная индукция в данной точке зависит от вида вещества, т. е. от свойства среды. Пусть  $\vec{B}$  и  $\vec{B}_0$  будут соответственно магнитными индукциями избранной однородной среды и вакуума.

Величина, определяемая их отношением

$$\mu = \frac{B}{B_0}, \quad (93.3)$$

показывает, во сколько раз индукция среды больше (или меньше) индукции в вакууме. Ее называют магнитной проницаемостью среды. Эта безразмерная величина зависит от вида вещества и температуры. Для вакуума  $\mu = 1$ .

**Напряженность магнитного поля.** Было принято характеризовать магнитное поле в вакууме не через индукцию  $\vec{B}_0$ , а через напряженность  $\vec{H}$  магнитного поля.

Вектор магнитной индукции связан с вектором напряженности следующим соотношением:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} \quad \text{или} \quad \vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}, \quad (93.4)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$  — магнитная постоянная.

Объединив (93.3) и (93.4), можно написать

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}. \quad (93.5)$$

Если для данной точки поля известна напряженность поля и магнитная проницаемость среды, то с помощью выражения (93.5) можно найти индукции поля для данной точки. Единица напряженности магнитного поля в СИ —  $1 \frac{\text{А}}{\text{м}}$ :

$$[H] = \frac{[B_0]}{[\mu]} = \frac{1 \text{ Тл}}{1 \frac{\text{Гн}}{\text{м}}} = 1 \frac{\text{А}}{\text{м}};$$

$1 \frac{\text{А}}{\text{м}}$  — напряженность такого поля, магнитная индукция которой равна  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Тл}$ .

**Индукция магнитного поля и микротоки.** Как было отмечено выше, согласно гипотезе Ампера, в любом теле существуют микроско-

пические токи, обусловленные движением электронов в атомах и молекулах. Эти микротоки создают свое магнитное поле, и под действием внешнего поля, т.е. макротоков, могут поворачиваться. В результате они создают в веществе дополнительное магнитное поле.

Вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  таким образом характеризует результирующее магнитное поле, создаваемое всеми макро- и микротоками, т.е. при одном и том же токе и прочих равных условиях вектор  $\vec{B}$  в различных средах будет иметь разные значения.

Магнитное поле, создаваемое макротоками, описывается вектором напряженности  $\vec{H}$ . Мы видели, что между  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  существует связь (93.5). Магнитная проницаемость  $\mu$  показывает, во сколько раз магнитное поле макротоков  $\vec{H}$  усиливается за счет поля микротоков среды.



### Вопросы для самопроверки

1. Что называют магнитной индукцией? 2. Каким будет направление вектора магнитной индукции? 3. В каком положении будет контур, если совпадают направления магнитного момента контура и вектора магнитной индукции? 4. Какова единица магнитной индукции в СИ и что это за индукция? 5. Какие линии называют линиями магнитной индукции? 6. Как можно наблюдать линии магнитной индукции? 7. Какими будут линии магнитной индукции вокруг прямого проводника с током? 8. Каков характер линий магнитной индукции? 9. Почему магнитное поле называют вихревым? 10. Как определяется направление линий вектора магнитной индукции? 11. Какое магнитное поле называют однородным? 12. Можно ли определить значение вектора магнитной индукции с помощью линий индукции? 13. Зависит ли магнитное поле от среды? 14. Какую величину называют магнитной проницаемостью среды? 15. Какова единица магнитной проницаемости в СИ и чему равно ее значение в вакууме? 16. Для чего вводится понятие напряженности магнитного поля? 17. Как она определяется? 18. Каково значение магнитной постоянной? 19. Как можно найти индукцию некоторой точки поля? 20. Какова единица напряженности магнитного поля в СИ и что это за напряженность? 21. Чему равен вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ ? 22. Чему равна напряженность магнитного поля  $H$ ? 23. Какой физический смысл имеет магнитная проницаемость  $\mu$ ?



### § 94. Закон Био-Савара-Лапласа

**Содержание:** Закон Био-Савара-Лапласа: принцип суперпозиции для вектора магнитной индукции; магнитное поле кругового тока; магнитное поле прямого тока; магнитное поле соленоида или тороида.

**Закон Био-Савара-Лапласа.** Магнитное поле постоянных токов различной формы изучалось французскими учеными М. Био (1774—1786) и Ф. Саваром (1791—1841). Результаты этих опытов были обобщены французским физиком и математиком П. Лапласом (1749—1827).

В этом законе было определено значение вектора магнитной индукции, создающего в некоторой точке  $A$  элемент проводника  $\Delta l$  с током  $I$  (рис. 155):

$$\Delta B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I \cdot \Delta l \cdot \sin \alpha}{r^2}, \quad (94.1)$$

где  $\vec{r}$  — радиус-вектор от элемента тока  $\Delta l$  до точки  $A$ ;  $r$  — его модуль;  $\alpha$  — угол между направлением тока и  $\vec{r}$ ; Выражение (94.1) выражает закон Био-Савара-Лапласа. Направление  $\Delta B$  определяется правилом буравчика с правым винтом. Если поступательное движение буравчика соответствует направлению тока, то направление вращения ручки буравчика дает направление вектора магнитной индукции.

**Принцип суперпозиции для вектора магнитной индукции.** Как и для электрического, для магнитного поля справедлив принцип суперпозиции. Магнитное поле, создаваемое несколькими токами, равно векторной сумме индукций магнитных полей, создаваемых каждым током в отдельности, т.е.

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n, \quad (94.2)$$

где  $n$  — число токов.

Применение закона Био-Савара-Лапласа совместно с принципом суперпозиции позволяет довольно просто рассчитать конкретные поля.

**Магнитное поле кругового тока.** Используя закон Био-Савара-Лапласа, найдем индукцию магнитного поля в центре (т.е. в точке  $O$ ) кругового проводника радиуса  $r$ , по которому течет ток  $I$ . Для этого разделим проводник на  $n$  частей длиной  $\Delta l$ . Величина  $\Delta l$  должна быть очень маленькой по сравнению с  $r$ . Согласно закону Био-Савара-Лапласа индукция магнитного поля, созданного элементом  $\Delta l$  в точке  $O$ :

$$\Delta B_i = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi} \frac{\sin \alpha}{r^2} \Delta l_i. \quad (94.3)$$

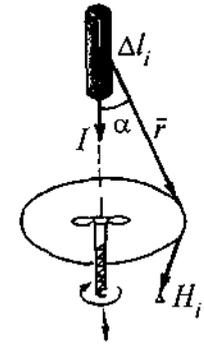


Рис. 155

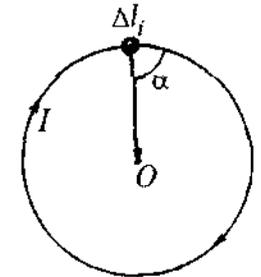


Рис. 156

Из рисунка 156 видно, что угол между радиусом-вектором  $\vec{r}$  и направлением тока  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ . Значит,  $\sin \alpha = \sin \frac{\pi}{2} = 1$ .

Для нахождения полной индукции в точке  $O$  найдем суперпозицию индукций, созданных всеми элементами (частями) тока  $\Delta l$

$$B = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I}{r^2} \Delta l_i = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I}{r^2} \sum_{i=1}^n \Delta l_i.$$

Если учесть, что сумма всех элементов тока  $\Delta l$  равна длине окружности, то

$$\sum_{i=1}^n \Delta l_i = 2\pi r.$$

Индукция магнитного поля

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2r}. \quad (94.4)$$

Следовательно, индукция магнитного поля в центре кругового тока прямо пропорциональна силе тока, текущего по проводнику и обратно пропорциональна радиусу кругового тока.

Направление вектора индукции определяется правилом буравчика. Если направление вращения ручки буравчика соответствует направлению тока, то поступательное движение острия буравчика дает направление вектора индукции.

**Магнитное поле прямого проводника.** Индукция магнитного поля тока, протекающего по бесконечно длинному, тонкому проводнику на расстоянии  $R$  от него, равна:

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi R}. \quad (94.5)$$

**Магнитное поле соленоида или тороида.** Индукция магнитного поля внутри бесконечно длинного соленоида или тороида, по которому течет ток, равна:

$$B = \mu_0 \mu I n, \quad (94.6)$$

где  $n$  — число витков, приходящихся на единицу длины соленоида или тороида.



#### Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа. 2. Что позволяет определить закон Био-Савара-Лапласа? 3. Как определяется направление вектора магнитной индукции? 4. В чем заключается принцип суперпозиции для вектора магнитной индукции? 5. Какова магнитная индукция в центре кругового тока? 6. Расскажите правило буравчика для направления вектора магнитной индукции. 7. Что такое индукция магнитного поля прямого проводника? 8. Что такое индукция магнитного поля соленоида или тороида?

## § 95. Закон Ампера

Содержание: закон Ампера; единица магнитной индукции; правило левой руки.

**Закон Ампера.** Один из методов демонстрации существования магнитного поля — это его действие на проводник с током. В 1820 году А. Ампер установил закон, определяющий силу, действующую со стороны магнитного поля на проводник с током. На элемент проводника с током, находящегося в однородном магнитном поле с индукцией  $B$  действует сила, прямо пропорциональная длине элемента  $\Delta l$ , силе тока  $I$  и индукции магнитного поля  $B$ :



А. Ампер  
(1775—1836)

$$F = B \cdot I \cdot \Delta l \cdot \sin \alpha, \quad (95.1)$$

где  $\alpha$  — угол между направлением тока в проводнике и вектором индукции  $\vec{B}$ .

Если угол между направлением тока и вектором магнитной индукции  $\alpha = 0$ , то  $\sin \alpha = 0$ , тогда действующая сила тоже будет равна нулю.

**Единица магнитной индукции.** С помощью закона Ампера можно также определить единицу магнитной индукции  $\vec{B}$ . Для этого пусть элемент проводника  $\Delta l$ , по которому течет ток  $I$ , будет расположен перпендикулярно направлению магнитного поля:

$$F = B \cdot I \cdot \Delta l. \quad (95.2)$$

Отсюда

$$B = \frac{1}{I} \frac{F}{\Delta l}; \quad (95.3)$$

$$[B] = \frac{[F]}{[I][l]} = \frac{1\text{Н}}{1\text{А} \cdot 1\text{м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1\text{Тл}.$$

1Тл — индукция однородного магнитного поля, действующего с силой 1Н на каждый метр длины прямолинейного проводника с током 1А, если проводник расположен перпендикулярно направлению поля.

**Правило левой руки.** Для определения направления силы, действующей на расположенный в магнитном поле проводник с током, пользуются правилом левой руки. Если ладонь левой руки в магнитном поле расположить так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, четыре вытянутых пальца покажут направление тока, то отогнутый большой палец покажет

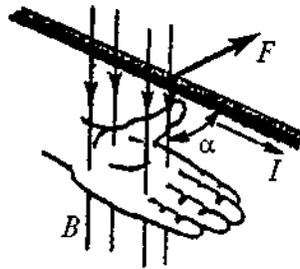


Рис. 157

направление силы, действующей на отрезок проводника с током (рис. 157).

Это сила всегда будет перпендикулярна плоскости, на которой лежит проводник и вектору  $\vec{B}$ .

Зная модуль и направление силы, действующей на любой элемент проводника  $\Delta l_i$ , согласно принципу суперпозиции можно найти полную силу, действующую на проводник.



**Вопросы для самопроверки**

1. Сформулируйте закон Ампера.
2. Чему будет равна действующая сила магнитной индукции, если проводник располагается вдоль линии магнитной индукции?
3. Какова единица магнитной индукции в СИ и что это за индукция?
4. Что позволяет определить правило левой руки?
5. Сформулируйте правило левой руки.
6. Как направлена сила, действующая на проводник, относительно плоскости, на которой лежит проводник к вектору индукции  $\vec{B}$ ?



**§ 96. Взаимодействие параллельных токов**

**Содержание:** действие проводника с током; взаимодействие параллельных токов; единица силы тока; магнитная постоянная.

**Действие проводника с током.** Закон Ампера можно применить для определения силы взаимодействия двух токов. Пусть два проводника 1 и 2 расположены друг от друга на расстоянии в одной, родной, изотропной с магнитной проницаемостью  $\mu$  среде. По ним протекают параллельные токи  $I_1$  и  $I_2$  (рис. 158). Первый проводник с током  $I_1$  создает вокруг себя магнитное поле и это поле действует на второй проводник с током  $I_2$ . На втором проводнике выделим произвольный элемент  $\Delta l_i$ . На него действует сила Ампера

$$\Delta F_i = B_1 \cdot I_2 \cdot \Delta l_i \cdot \sin \alpha, \quad (96.1)$$

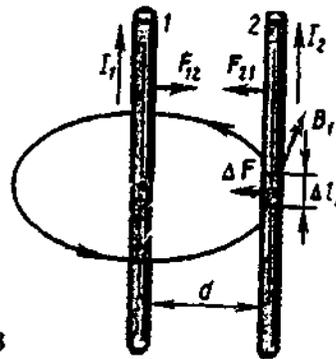


Рис. 158

где 
$$B_1 = \frac{\mu_0 \mu I_1}{2\pi d} \quad (96.2)$$

индукция магнитного поля, созданного первым проводником, т.е. вектор  $\vec{B}_1$  перпендикулярен проводнику с током  $I_2$ . Тогда

$$\alpha = \frac{\pi}{2}, \quad \sin \alpha = 1.$$

Учитывая (96.2), снова перепишем (96.1):

$$\Delta F_i = \frac{\mu_0 \mu I_1}{2\pi d} I_2 \Delta l_i. \quad (96.3)$$

Чтобы найти силу  $F_{21}$ , действующую со стороны первого проводника на второй, согласно принципу суперпозиции должны сложить все  $\Delta F_i$ :

$$F_{21} = \sum_{i=1}^n \Delta F_i = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2}{2\pi d} \sum_{i=1}^n \Delta l_i = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2}{2\pi d} l.$$

Здесь приняли во внимание, что  $\sum_{i=1}^n \Delta l_i = l$ . Таким образом, сила, действующая со стороны первого проводника с током на второй, определяется следующим образом:

$$F_{21} = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2}{2\pi d} l. \quad (96.4)$$

**Взаимодействие параллельных токов.** Теперь рассмотрим обратный случай: пусть первый проводник находится в поле, созданном вторым проводником. После приведенных выше вычислений найдем силу, действующую со стороны второго проводника на первый:

$$F_{12} = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2}{2\pi d} l. \quad (96.5)$$

Сравнение выражений (96.4) и (96.5) показывает, что значения действующих сил равны и направлены в противоположную сторону. Значит, если по параллельным проводникам течет ток в одинаковом направлении, то на каждый из них со стороны магнитного поля, созданного вторым проводником, действует сила, величина которого равна:

$$F_{12} = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2}{2\pi d} l. \quad (96.6)$$

**Сила взаимодействия параллельных проводников с током прямо пропорциональна произведению силы протекающего тока и обратно пропорциональна расстоянию между ними.**

**Единица силы тока.** Одной из основных единиц СИ является ампер (А), который определяется на основании взаимодействия параллельных прямолинейных токов и назван так в честь французского физика А. Ампера.

**1 А** равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, на расстоянии 1 м один от другого в вакууме вызвал бы силу взаимодействия между этими проводниками, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на каждый метр длины.

**Магнитная постоянная.** Чтобы найти значение  $\mu_0$ , вид выражения (96.6) изменим следующим образом и будем считать, что проводники находятся в вакууме ( $\mu = 1$ ):

$$\mu_0 = 2\pi \left( \frac{d}{I_1 I_2} \right) \cdot \left( \frac{F}{l} \right). \quad (96.7)$$

Если  $I_1 = I_2 = 1 \text{ А}$ ,  $d = 1 \text{ м}$ ,  $\left( \frac{F}{l} \right) = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ , то подставив эти значения в формулу (96.7), получим

$$\mu_0 = 2\pi \left( \frac{1 \text{ м}}{1 \text{ А}^2} \right) \cdot 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{м}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}},$$

где генри (Гн) — единица индуктивности.



#### Вопросы для самопроверки

1. Расскажите о силе, действующей со стороны проводника с током на элемент с током другого проводника. 2. Расскажите о силе взаимодействия двух параллельных токов. 3. Расскажите о единице силы тока в СИ. 4. 1 А — сила какого тока? 5. Расскажите о значении магнитной постоянной.



#### § 97. Магнитный поток

**Содержание:** магнитный поток; знак магнитного потока; единица магнитного потока.

**Магнитный поток.** Рассмотрим с замкнутый плоский контур, находящийся в однородном магнитном поле с вектором индукции  $\vec{B}$ . Поток вектора магнитной индукции (магнитным потоком) через площадку  $\Delta S$  называют скалярную физическую величину, равную произведению  $B_n$  (проекция вектора магнитной индукции на направление нормали к площадке) на площадь поверхности:

$$\Delta F = B_n \cdot \Delta S = B \cdot \Delta S \cdot \cos \alpha, \quad (97.1)$$

где  $\alpha$  — угол между направлением нормали  $\vec{n}$  и вектором индукции  $\vec{B}$  (рис. 159).

$B_n = B \cdot \cos \alpha$  является скалярной величиной и магнитный поток тоже является скалярной величиной. В общем случае, магнитный поток характеризует число линий магнитной индукции через эту поверхность.

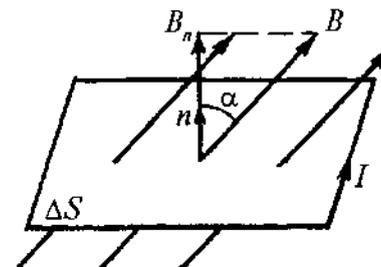


Рис. 159

**Знак магнитного потока.** В зависимости от того, какой знак принимает  $\cos \alpha$ , магнит-поток может быть положительным ( $\Phi > 0$ ) и отрицательным ( $\Phi < 0$ ). Знак  $\cos \alpha$  зависит от выбора положительного направления нормали. Положительное направление нормали же зависит от направления тока в рассматриваемом контуре и определяется правилом буравчика с правым винтом. Магнитный поток через замкнутую поверхность равен нулю, так как равно число входящих и выходящих в него силовых линий.

**Единица магнитного потока.** Единица магнитного потока в СИ — вебер (Вб) — названа в честь немецкого физика В. Вебера (1804—1891).

1 Вб — магнитный поток, проходящий через плоскую поверхность площадью 1 м<sup>2</sup>, расположенную перпендикулярно однородному магнитному полю, индукция которого равна 1 Тл.



#### Вопросы для самопроверки

1. Какую величину называют магнитным потоком? 2. Магнитный Поток — скалярная или векторная величина? 3. Связан ли магнитный поток с линиями индукции? 4. Как определяется знак магнитного потока? 5. Чему равен магнитный поток через замкнутый контур? 6. Какова единица магнитного потока в СИ и что это за поток?



#### § 98. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

**Содержание:** работа по перемещению проводника с током в магнитном поле; зависимость работы от изменения магнитного потока.

На проводник с током в магнитном поле действует сила, определяемая законом Ампера. Для определения работы этой силы соберем цепь, как показано на рисунке 160, и чтобы проводник мог перемещаться под действием силы Ампера. Одна из сторон контура изготовлена в виде подвижной перемычки.

Если эту систему поместим в однородное магнитное поле, вектор индукции которого направлен перпендикулярно плоскости рисунка, проводник переместится. Величина силы, дей-

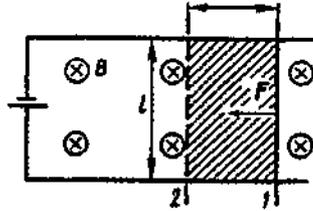


Рис. 160

ствующая на проводник, определяется согласно закону Ампера, а направление — правилу левой руки. Так как  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , то  $\sin \alpha = 1$  и сила Ампера принимает вид

$$F = B \cdot l \cdot I. \quad (98.1)$$

Проводник под действием силы  $F$  переместится на  $\Delta x$  из положения 1 в положение 2. При этом совершается следующая механическая работа, т.е.

$$\Delta A = F \cdot \Delta x = B \cdot I \cdot l \cdot \Delta x. \quad (98.2)$$

В этом выражении  $l \cdot \Delta x = S$  — площадь, пересекаемая проводником при его перемещении. Тогда согласно (98.1)

$$\Delta A = I \cdot B \cdot \Delta S = I \cdot \Delta \Phi. \quad (98.3)$$

Работа, совершаемая силой Ампера по перемещению проводника с током в магнитном поле, равна произведению силы тока на магнитный поток, пересеченный движущимся проводником.

Так как  $\Delta \Phi$  характеризует число линий магнитной индукции, которые проводник пересекает при своем движении, для того чтобы определить работу при некотором перемещении линейного проводника, надо взять сумму линий магнитной индукции, которые пересекают проводник.



#### Вопросы для самопроверки

1. Какой целью надо воспользоваться, чтобы наблюдать перемещение проводника? 2. Чему будет равна сила Ампера, если вектор индукции и направление тока будут взаимно перпендикулярны? 3. Чему равна механическая работа при перемещении проводника? 4. Какова работа силы Ампера при перемещении проводника с током в магнитном поле? 5. Зависит ли эта сила от магнитного потока, пересекающего проводник?



Содержание: Сила Лоренца; действие и направление силы Лоренца.

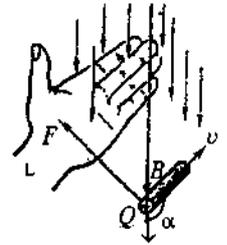
**Сила Лоренца.** Как показывают опыты, магнитное поле действует не только на проводник с током, но и на отдельные заряды, движущиеся в магнитном поле, так как движущийся заряд тоже создает вокруг себя магнитное поле.

**Силу, действующую на электрический заряд  $q$ , движущийся со скоростью  $v$  в магнитном поле, называют силой Лоренца и она выражается формулой:**

$$\vec{F}_A = q[\vec{v} \cdot \vec{B}] \text{ или } F_A = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (99.1)$$

где  $B$  — индукция магнитного поля, в котором заряд движется,  $\alpha$  — угол между вектором скорости движения  $\vec{v}$  и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ .

**Направление сила Лоренца.** Направление силы Лоренца для положительного заряда определяется с помощью правила левой руки. Если ладонь левой руки в магнитном поле расположить так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца показывали направление движение положительного заряда, то отогнутый большой палец покажет направление силы Лоренца (рис. 161). При изменении знака заряда направление силы меняется на противоположное. Из сказанного выше и из рисунке 161 видно, что сила Лоренца направлена перпендикулярно скорости  $\vec{v}$  и вектору индукции  $\vec{B}$ .



161-гasm.

**Действие силы Лоренца.** Из выражения (99.1) видно:

1) если частица покоится, т.е.  $v = 0$ , тогда  $F_A = 0$ . Значит, магнитное поле не действует на покоящийся электрический заряд, т.е. вокруг покоящегося заряда нет магнитного поля.

2) если  $\alpha = 0$ , заряд движется вдоль вектора магнитной индукции (вектор скорости  $\vec{v}$  будет параллелен вектору индукции  $\vec{B}$ ), тогда на заряд со стороны магнитного поля не действует никакая сила.

3) так как сила Лоренца перпендикулярна скорости движения заряда, она не изменяет кинетическую энергию, следовательно, сила Лоренца не совершает работы.

4) так как сила Лоренца перпендикулярна скорости движения заряда, она изменяет только направление этой скорости. Если заряд движется в однородном поле, сила Лоренца выполняет функцию центростремительной силы и искривляет траекторию движения частицы.



#### Вопросы для самопроверки

1. Действует ли магнитное поле на неподвижный заряд? А на движущийся заряд? 3. Что такое сила Лоренца? 4. Как определяется направление силы Лоренца? 5. Изменится ли направление силы Лоренца, если изменится знак заряда? 6. Почему сила Лоренца не действует на неподвижный заряд? 7. Будет ли действовать сила Лоренца на заряд, если он движется вдоль линии магнитной индукции? 8. Изменяется ли кинетическая энергия заряда под действием силы Лоренца? 9. Совершает ли сила Лоренца работу? 10. Какое изменение происходит в движении заряда под действием силы Лоренца?

**§ 100. Магнитосфера, солнечный ветер.**

**Содержание:** магнитосфера; солнечный ветер; действие солнечного ветра на Землю.

**Магнитосфера.** Магнитосферой называют определенное пространство вокруг Земли, определяемое собственным магнитным полем Земли. Ее свойства, размеры и форма определяются потоком заряженных частиц, приходящих от Солнца, т.е. на основе взаимодействия с солнечным ветром. Магнитосфера не похожа на сферу: противоположная к Солнцу сторона сильно вытянута. Если магнитное поле Земли с солнечной стороны сжимается плазмой, содержащейся в солнечном ветре, силовые линии магнитного поля с противоположной стороны сильно вытягиваются (рис. 162). Длина хвоста может быть больше земного радиуса в сорок раз.

**Солнечный ветер.** Солнечный ветер — это постоянный радиальный поток, состоящий из плазмы и испускающий в межпланетную среду солнечной короной. Он состоит в основном из протона, в малых количествах ядра гелия, ионов кислорода, кремния, серы, железа. Эти частицы достигают орбиты Земли с очень большой скоростью. Например, скорость протонов составляет 300—750 км/с. Столкновение около Земли частиц солнечного ветра с геомагнитным полем Земли создает перед магнитосферой стационарный фронт ударной волны. В результате солнечный ветер как бы обтекает поверхность магнитосферы.

**Действие солнечного ветра на Землю.** В общем случае магнитосфера почти не пропускает на Землю солнечный ветер. Основная

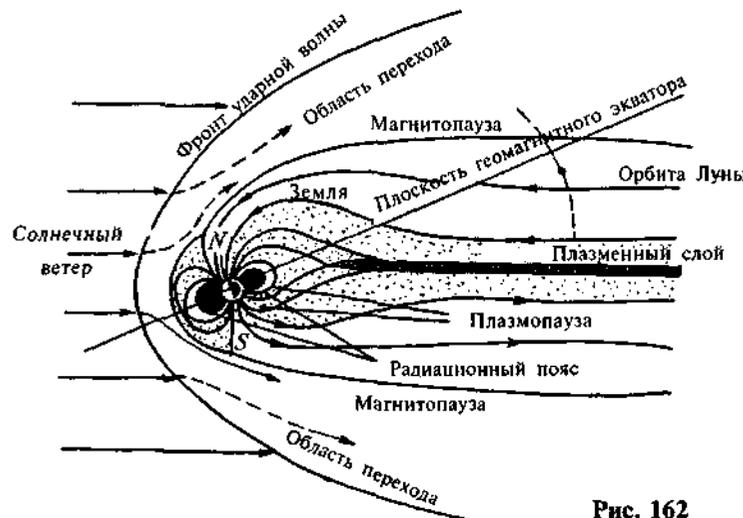


Рис. 162

часть солнечного ветра обходит магнитопаузу, расположенную от Земли на расстоянии десяти земных радиусов. Проникшие через них частицы с энергиями в сотни кэВ задерживаются магнитными ловушками, т.е. магнитным полем магнитосферы. Эти частицы образуют радиационный пояс Земли. Вместе с этим на магнитных полюсах Земли имеются прозрачные места, куда стекают частицы солнечного ветра. Эти частицы создают полярное сияние. В результате вспышек на Солнце интенсивность солнечного ветра может резко измениться и вызвать в магнитосфере магнитные бури. В результате происходит усиление полярного сияния, увеличение потока частиц в радиационных поясах и изменение магнитного поля Земли.

Исследования, проведенные с помощью космических аппаратов, показали наличие магнитосферы у других планет: Меркурия, Юпитера, Сатурна, Венеры.



**Вопросы для самопроверки**

1. Что называют магнитосферой?
2. Как определяются размеры и свойства магнитосферы?
3. Какой вид имеет магнитосфера?
4. Почему противоположная к солнцу сторона магнитосферы бывает вытянутой?
5. Что такое солнечный ветер?
6. Каков состав солнечного ветра?
7. Чему равна скорость протонов, имеющих в составе магнитосферы?
8. Что заставляет солнечный ветер обтекать магнитосферу?
9. Достигает ли солнечный ветер Землю?
10. Какой слой обтекает солнечный ветер?
11. Что задерживает частицы, прошедшие магнитопаузу?
12. Достигает ли поверхности Земли какая-нибудь часть солнечного ветра?
13. Как возникает полярное сияние?
14. Какие изменения на Земле могут вызвать вспышки на Солнце?
15. Имеется ли магнитосфера у других планет?

**§ 101. Парамагнетики, диамагнетики, ферромагнетики.**

**Содержание:** диамагнетики; парамагнетики; ферромагнетики; теория доменов; точка Кюри; гистерезис.

**Диамагнетики.** Большинство атомов диамагнетиков не обладает собственным магнитным моментом, их магнитные моменты возникают за счет действия внешнего магнитного поля. Этот процесс похож на процесс возникновения электрического момента у неполярных диэлектриков. Учитывая, что возникающее магнитное поле пропорционально индукционному внешнему полю  $\vec{B}_0$ , можно написать (как для диэлектриков)

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0, \quad (101.1)$$

здесь для диамагнетиков  $\mu < 1$ , так как магнитное поле микротоков, возникающих под действием внешнего поля, направлено в сторону ослабления внешнего поля.

Свойство диамагнетиков не зависит от температуры, так как тепловое движение атомов не может нарушить направление токов, возникающих внутри атома. Диамагнитный эффект присущ всем веществам. Типичные представители диамагнетиков — вода, мрамор, золото, медь, ртуть и инертные газы.

**Парамагнетики.** Молекулы парамагнетиков обладают отличным от нуля собственным моментом. В отсутствие магнитного поля эти моменты располагаются беспорядочно, магнитный момент тела будет равен нулю.

Когда парамагнетик вносится в магнитное поле, магнитные моменты отдельных атомов и молекул устанавливаются по магнитному полю. В результате собственное магнитное поле парамагнетиков усиливает внешнее магнитное поле, т.е. происходит усиление внешнего магнитного поля ( $\mu > 1$ ).

Намагниченность парамагнетиков зависит от температуры и с повышением температуры ухудшается магнитная проницаемость. Причина этому то, что вследствие теплового движения ориентация магнитных моментов атомов и молекул, происшедших под действием внешнего магнитного поля, нарушается.

Магнитная проницаемость парамагнетиков, так же как у диамагнетиков, не зависит от индукции внешнего магнитного поля.

К парамагнетикам относятся: кислород, алюминий, платина и щелочные металлы.

**Ферромагнетики.** Ферромагнетизм считается граничным состоянием парамагнетизма. Ферромагнетики считаются сильными магнетиками и могут самопроизвольно намагнититься. Даже при отсутствии внешнего магнитного поля они намагничены. Еще

одно свойство ферромагнетиков — это сложный вид намагниченности от внешнего магнитного поля (рис. 163).

Если зависимость намагниченности от внешнего магнитного поля для диамагнетиков и парамагнетиков линейная, то для ферромагнетиков она имеет сложный вид. Сначала намагниченность растет быстро, затем медленнее и по достижении определенного значения становится постоянной. Это значение намагниченности называется магнитным насыщением. Подобную зависимость можно

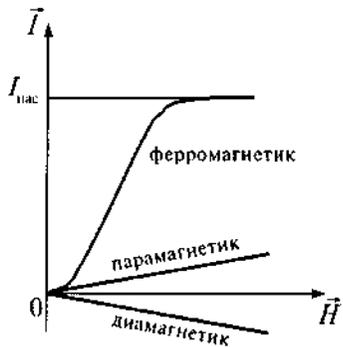


Рис. 163

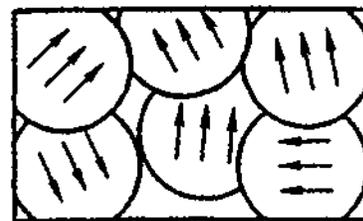


Рис. 164

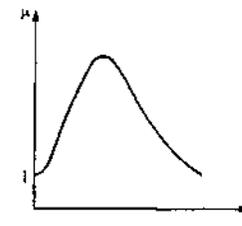


Рис. 165

объяснить тем, что по мере увеличения внешнего поля растет число магнитных моментов молекул, ориентированных по полю. По мере уменьшения числа молекул, у которых магнитные моменты не ориентированы по полю, уменьшается и намагниченность и, наконец, когда все магнитные моменты ориентируются по полю, наступает магнитное насыщение.

**Теория доменов.** Как показывают опыты, некоторые ферромагнетики самопроизвольно намагничиваются независимо от того, существует ли внешнее поле или нет. Чтобы объяснить это явление, французский физик П. Вейс (1865—1940) выдвинул гипотезу о доменах. Согласно этой гипотезе, ферромагнетик состоит из большого числа микроскопических областей — доменов и они самопроизвольно намагничены (рис. 164). При отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты отдельных доменов ориентированы в пространство хаотично и компенсируют друг друга. Когда ферромагнетик вводят во внешнее поле, то поле действует не на отдельные атомы и молекулы, а ориентирует домены по полю. Именно поэтому с увеличением напряженности поля намагниченность растет очень быстро (рис. 163). Домены могут самопроизвольно расположиться по полю.

В отличие от диамагнетиков и парамагнетиков магнитная проницаемость ферромагнетиков зависит от внешнего поля (рис. 165).

Магнитная проницаемость ферромагнетиков может быть очень большой. Например, для железа  $\mu=5000$ , а для сплава супермаллоя  $\mu=800000$  и т.д. Ферромагнитные явления впервые были изучены на железе. Отсюда и возникновение слова ферромагнетизм.

**Точка Кюри.** Ферромагнетики обладают одной существенной особенностью. Для каждого ферромагнетика имеется определенная температура, называемая *точкой Кюри*, при которой ферромагнетик теряет свои магнитные свойства. Ферромагнетики выше точки Кюри превращаются в парамагнетики. Точка Кюри для железа 1043 К, для кобальта 1393 К, для никеля 631 К.

**Гистерезис.** Мы выше видели, что магнитная проницаемость ферромагнетиков зависит от напряженности  $H$  внешнего поля.

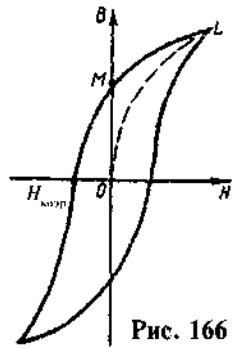


Рис. 166

Теперь рассмотрим зависимость между магнитной индукцией  $B$  и  $H$ . При намагничивании поле внутри ферромагнетика растет от 0 до определенного значения  $H$  (рис. 166). Изменение индукции в ферромагнетике характеризуется линией  $OL$ . Если будем уменьшать  $H$ , уменьшение индукции описывается кривой  $LM$ . При  $H=0$  индукция отличается от нуля. Чтобы убрать остаточную намагниченность, требуется приложить поле противоположного направления. Значение магнитного поля, при котором  $B=0$ , называют задерживающей, или коэрцитивной силой  $H_{\text{коэр}}$ .

При изменении поля индукция изменяется как показано на рисунке 166. Полученную замкнутую кривую называют *петлей гистерезиса*. От значения коэрцитивной силы ферромагнетика делятся на магнитомягкие и магнитотвердые.

У магнитомягких ферромагнетиков петля гистерезиса бывает узкой и величина коэрцитивной силы маленькая. К ним относятся железо, пермаллой и другие. Из магнитомягких ферромагнетиков изготавливают сердечники для трансформаторов, генераторов, электродвигателей.

У магнитотвердых ферромагнетиков петля гистерезиса бывает широкой и значение коэрцитивной силы большая.

Следует отметить, что площадь петли гистерезиса определяет работу, которую необходимо совершить, чтобы размагнитить ферромагнетик.

К магнитотвердым ферромагнетикам относятся сталь и его сплавы, обычно из них изготавливают постоянные магниты.

Ниже приводим магнитные проницаемости некоторых веществ.

Таблица 10

Парамагнетики	$\mu$	Диамагнетики	$\mu$
Азот (газ)	1,00013	Водород (газ)	0,999937
Воздух (газ)	1,000038	Вода	0,999991
Кислород (газ)	1,000017	Стекло	0,999987
Кислород (жидкий)	1,0034	Цинк	0,999991
Эбонит	1,000014	Серебро	0,999981
Алюминий	1,000023	Золото	0,999963
Вольфрам	1,000253	Медь	0,999912
Платина	1,000253	Висмут	0,999824



### Вопросы для самопроверки

1. Какие вещества называют диамагнетиками?
2. Имеют ли собственный магнитный момент атомы диамагнетиков?
3. Как образуются собственные магнитные моменты атомов?
4. Чему равна возникающая индукция магнитного поля?
5. Как изменяет внешнее магнитное поле магнитный момент микротоков, возникающих в диамагнетиках под действием внешнего магнитного поля?
6. Зависит ли свойство диамагнетиков от температуры?
7. Приведите примеры диамагнетиков.
8. Обладают ли собственным магнитным моментом молекулы парамагнетиков?
9. Как действует на парамагнетики внешнее магнитное поле?
10. Как изменяет внешнее поле собственное поле парамагнетиков?
11. Зависит ли намагниченность парамагнетиков от температуры?
12. Зависит ли от индукции внешнего магнитного поля магнитная проницаемость парамагнетиков?
13. Приведите примеры парамагнетиков.
14. Назовите особые свойства ферромагнетиков.
15. Зависит ли намагниченность ферромагнетиков от внешнего поля?
16. Какое значение магнитного поля называют полем насыщения?
17. Что объясняет гипотеза доменов?
18. Что называют доменами?
19. Какое действие оказывает внешнее поле на домены?
20. Приведите примеры ферромагнетиков.
21. Какая температура называется точкой Кюри?
22. Приведите примеры точки Кюри.
23. Какая линия называется петлей гистерезиса?
24. Какую силу называют коэрцитивной?
25. Одинакова ли для всех ферромагнетиков петля гистерезиса?
26. Что показывает площадь петли гистерезиса?



Содержание: магнитная запись информации; магнитная память ЭВМ; магнитные диски и их использование.

**Магнитная запись информации.** Сохранение и передача информации имеет важное значение, особенно запись звука и изображения. Каким образом все это осуществляется? Запись на магнитные ленты или диски основывается на изменении положения магнитных моментов. При воспроизведении звука, видео или чтении наблюдается обратный процесс, они воздействуют на специальные устройства и восстанавливают сигналы, соответствующие прежним положениям магнитных моментов. Чтобы лучше представить этот процесс, рассмотрим принцип работы магнитофона (рис. 167). При записи звуковые колебания преобразуются в микрофоне в электрические колебания и после усиления до необходимого значения подаются на электромагнит, называемый записывающей головкой (ЗГ). Прошедший через электромагнит (ЗГ) ток создает вокруг него магнитное поле,

**Дано:**

$$I_1 = 50 \text{ А};$$

$$I_2 = 100 \text{ А};$$

$$d = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м};$$

$$r_1 = 25 \text{ см} = 0,25 \text{ м};$$

$$r_2 = 40 \text{ см} = 0,4 \text{ м}.$$

$B = ?$

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2.$$

или для модуля  $\vec{B}$

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 - 2B_1B_2 \cdot \cos \alpha}.$$

$$\text{Здесь: } B_1 = \frac{\mu_0 \mu I_1}{2\pi r_1} \text{ и } B_2 = \frac{\mu_0 \mu I_2}{2\pi r_2},$$

угол  $\alpha$  найдем из теоремы косинусов

$$d^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \alpha$$

$$\cos \alpha = \frac{1}{2r_1r_2} (r_1^2 + r_2^2 - d^2).$$

На основе найденного можно следующим образом записать для  $B$ :

$$B = \frac{\beta \mu_0 \mu}{2\pi} \sqrt{\frac{I_1^2}{r_1^2} + \frac{I_2^2}{r_2^2} - \frac{I_1 I_2}{r_1 \cdot r_2} (r_1^2 + r_2^2 - d^2)}.$$

Подставив значение величин, находим  $B$  ( $\mu = 1$ ):

$$B = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\left(\frac{50}{0,25}\right)^2 + \left(\frac{100}{0,4}\right)^2 - \frac{50 \cdot 100}{(2,25)^2 \cdot (0,4)^2} [(0,25)^2 + (0,4)^2 - (0,2)^2]} =$$

$$= 21,2 \cdot 10^{-6} \text{ Т} = 21,2 \text{ мкТл}.$$

Ответ:  $B = 21,2 \text{ мкТл}$ .

**Задача 2.** Найти частоту вращения электрона, двигающегося по круговой орбите в поле с индукцией 0,2 Тл.

**Дано:**

$$B = 0,2 \text{ Т}.$$

$n = ?$

**Решение:** Частота вращения электрона по круговой орбите определяется следующим образом:

$$n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{v}{2\pi R}.$$

**Решение:** Индукция магнитного поля  $\vec{B}$ , в точке  $A$ , согласно принципу суперпозиции, равна сумме векторов  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$ , образованных токами  $I_1$  и  $I_2$  (рис. 169):

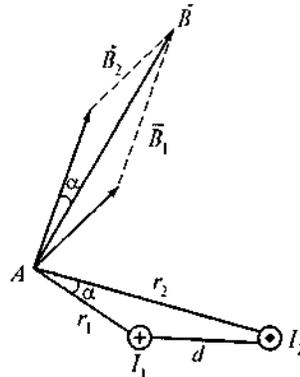


Рис. 169

Чтобы найти скорость движения электрона с постоянной частотой, воспользуемся равенством сил, действующих на него.

На электрон, двигающийся в магнитном поле, действует сила Лоренца  $F_L = q_e \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$  и центростремительная сила

$F_{u.c.} = \frac{m_e v^2}{R}$ , т.е. он совершает вращательное движение. Из условия  $F_n = F_{u.c.}$

$$q_e \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha = \frac{m_e v^2}{R}.$$

Теперь, принимая во внимание, что  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ,  $\sin \alpha = 1$ , найдем

$$\text{скорость электрона: } v = \frac{q_e \cdot B \cdot R}{m_e}.$$

Воспользовавшись этим выражением для скорости, для частоты электрона найдем:

$$n = \frac{q_e \cdot B}{2\pi \cdot m_e}.$$

Подставив значение величин ( $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ С}$ ;  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ ), найдем:

$$n = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,2}{2 \cdot 3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}} \text{ Гц} = 5,6 \cdot 10^9 \text{ Гц}.$$

Ответ:  $n = 5,6 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ .



### Задачи для самостоятельного решения

1. Найти напряженность магнитного поля, если индукция магнитного поля в вакууме равна 10 мТл. ( $H = 7,96 \text{ кН/м}$ )
2. Найти магнитную индукцию в центре тонкого кольца по которому течет ток 10 А. Радиус кольца 5 см. ( $B = 126 \text{ мкТл}$ )
3. Электрон в магнитном поле с индукцией 0,02 Тл описывает окружность радиусом 10 см. Найти кинетическую энергию электрона. ( $E_k = 0,35 \text{ мэВ}$ )
4. В проводнике с длиной активной части 8 см сила тока равна 50 А. Он находится в однородном магнитном поле с индукцией 20 мТл. Какую работу совершил источник, если проводник переместился на 10 см перпендикулярно линиям индукции? ( $A = 8 \text{ мДж}$ )

## Тестовые вопросы

1. Силу взаимодействия проводников с током называют... силами.

- А. Электрическими. В. Магнитными. С. Гравитационными.  
 D. Действующими на близком расстоянии. Е. Слабыми.

2. Среди приведенных выражений найдите напряженность магнитного поля и единицу измерения в СИ:

- А.  $\vec{H} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0}$ ;  $1 \frac{\text{Тл}}{\text{м}}$ . В.  $H = \frac{M_0}{B_0}$ ;  $1 \frac{\text{м}}{\text{Тл}}$ . С.  $H = \frac{B_0}{\mu_0}$ ;  $1 \frac{\text{А}}{\text{м}}$ .  
 D.  $H = \frac{B}{\mu \cdot \mu_0}$ ;  $1 \frac{\text{Тл}}{\text{м}}$ . Е. Правильного ответа нет.

3. Среди приведенных выражений найдите формулу силы Ампера и Лоренца:

1.  $F = qeLv \sin \alpha$ . 2.  $F = B \cdot I \cdot \Delta l \cdot \sin \alpha$ . 3.  $F = qE$ .  
 4.  $F = mg$ . 5.  $F = q \cdot v \cdot B \sin \alpha$ . 6.  $F = BI \Delta l \cdot \cos \alpha$ .  
 А. 1,2. В. 3,4. С. 5,6. D. 1,3. Е. 2,5.

## Основные выводы

Вокруг проводника с током возникает магнитное поле:  
 В природе не существует магнитного заряда.

Величина  $B = \frac{M_m}{P_m}$  является величиной, характеризующей данную точку поля и называется магнитной индукцией. Ее единица в СИ 1 Тл.

Магнитная проницаемость среды определяется как  $\mu = B/B_0$ .

Закон Био—Сарваара—Лапласа:  $\Delta B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I \Delta l \cdot \sin \alpha}{r^2}$ .

Принцип суперпозиции для вектора магнитной индукции:  
 $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$ .

Магнитное поле кругового тока:  $B = \frac{\mu_0 \mu I}{2r}$ .

Магнитное поля прямого проводника:  $B = \mu_0 \mu I / 2\pi R$ .

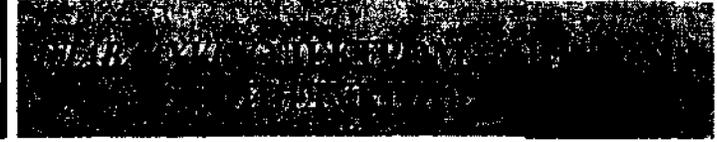
Магнитное поле соленоида или тороида:  $B = \mu_0 \mu In$ .

Закон Ампера:  $F = B \cdot J \cdot \Delta l \cdot \sin \alpha$ . Магнитная постоянная:  
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}$ .

Магнитный поток:  $\Delta \Phi = B_n \cdot \Delta S = B \cdot \Delta S \cdot \cos \alpha$ .

Работа, совершаемая по перемещению проводника с током в магнитном поле,  $\Delta A = I \cdot B \cdot \Delta S = I \cdot \Delta \Phi$ . Сила Лоренца:

$F_L = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$ .



**М. ФАРАДЕЙ**  
 (1791 – 1867)

В предыдущей главе было показано, что электрический ток вокруг себя создает магнитное поле. Если это так, то возникает вопрос: не может ли быть обратное, т.е. не может ли магнитное поле вызвать появление электрического тока? Ученые долгое время искали ответа на этот вопрос и наконец в 1831 году английский физик М. Фарадей показал с помощью опытов, что магнитное поле порождает электрический ток. Это явление называется явлением электромагнитной индукции, а возникающий ток — индукционным током.

Открытие явления электромагнитной индукции имеет огромное значение, т.е. доказало возможность получения электрического тока с помощью магнитного поля. Этим было показано существование связи между электрическими и магнитными явлениями, что послужило толчком для создания теории электромагнитного поля.

## § 103. Явление электромагнитной индукции. Опыты Фарадея

**Содержание:** явление электромагнитной индукции; опыты Фарадея; закон Фарадея; правило Ленца; природа ЭДС индукции.

**Явление электромагнитной индукции.** Основная идея электромагнитной индукции заключается в следующем: **в замкнутом контуре при изменении потока магнитной индукции, охватываемой этим контуром, возникает электрический ток.** Этот ток называется *индукционным*.

**Опыты Фарадея.** Если в катушку, соединенную с гальванометром, вдвигать или выдвигать постоянный магнит, то в моменты вдвигания или вывода стрелки наблюдается отклонение гальванометра, т.е. возникает индукционный ток (рис. 170). Отклонение стрелки гальванометра тем больше, чем больше скорость движения магнита относительно катушки. При изменении потоков магнита направление отклонения стрелки изменится. Для получения индукционного тока магнит можно оставлять неподвижным, тогда нужно передвигать соленоид магнита.

**Закон Фарадея.** Обобщая результаты своих многочисленных опытов, Фарадей пришел к выводу, что в замкнутом проводя-

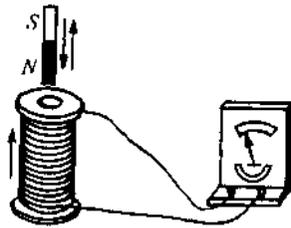


Рис. 170

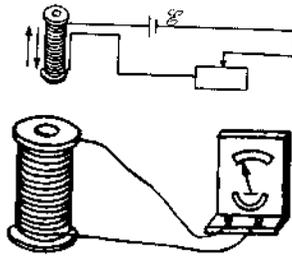


Рис. 171

шем контуре возникает индукционный ток при изменении числа линий магнитной индукции, пронизывающих площадь, ограниченную этим контуром. Величина индукционного тока зависит не от способа изменения потока магнитной индукции, а от скорости его изменения. Если в цепи возникает индукционный ток, то это указывает на наличие в цепи электродвижущей силы. Эту ЭДС называют электродвижущей силой электромагнитной индукции. Анализируя результаты опытов, Фарадей определил связь между ЭДС индукции и изменением магнитного потока.

**Закон Фарадея для электромагнитной индукции:** Какова бы ни была причина изменения потока магнитной индукции, охватываемого замкнутым контуром, возникающая в контуре ЭДС индукции определяется следующим образом:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (103.1)$$

Знак минус перед равенством показывает следующее: увеличение потока индукции  $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ , вызывает ЭДС  $\mathcal{E}_i < 0$ , т.е. поле индукционного тока направлено навстречу потоку. Уменьшение потока индукции  $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ , вызывает ЭДС  $\mathcal{E}_i > 0$ , т.е. направление потока и поля индукционного тока совпадают.

**Правило Ленца.** Знак минус в формуле (103.1) является математическим выражением правила, позволяющего найти направление индукционного тока, и сформулированного в 1833 году русским физиком Э. Ленцем (1804 — 1865).

**Правило Ленца:** индукционный ток в замкнутом проводнике имеет всегда такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызвавшего этот индукционный ток. Используя правило Ленца, закон Фарадея можно написать следующим образом:

Электродвижущая сила электромагнитной индукции в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока, через поверхность, ограниченную этим контуром.

ЭДС индукции не зависит от способа изменения магнитного потока.

**Природа ЭДС индукции.** Теперь нас интересует, какова природа появления ЭДС. Для этого проведем опыт, приведенный на рисунке 172. В магнитное поле вводится контур, у которого одна перемычка подвижная. Вектор индукции однородного магнитного поля направлен перпендикулярно от нас в плоскость рисунка. На электроны внутри движущегося проводника действует сила Лоренца. При движении проводника из 1 части во 2 изменяется и магнитный поток окружающего контура. Сила Лоренца, действующая на электроны внутри движущегося проводника, приводят их в движение, и возбуждается ЭДС индукции.

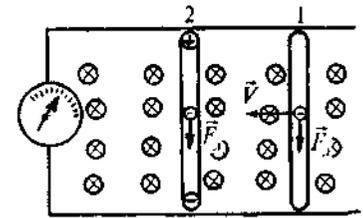


Рис. 172

Согласно закону Фарадея для электромагнитной индукции, если в переменном магнитном поле находится неподвижный проводник, то в нем тоже может возникнуть ЭДС электромагнитной индукции. Мы не можем сказать, что в этом случае она возникла за счет силы Лоренца, так как сила Лоренца не действует на неподвижные заряды.

Максвелл для объяснения ЭДС индукции в неподвижных проводниках предположил, что всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле, которое является причиной возникновения индукционного тока

ЭДС электромагнитной индукции выражается в вольтах.



### Вопросы для самопроверки

1. С какой целью искали электромагнитную индукцию?
2. Какое явление называют явлением электромагнитной индукции?
3. Какой ток называют индукционным?
4. Изменяется ли показание гальванометра, когда постоянный магнит вводят или выводят из катушки? Если постоянный магнит остается неподвижным, а двигается катушка?
5. От чего зависит отклонение гальванометра?
6. Изменяется ли отклонение стрелки, если поменять полюсы магнита?
7. Объясните опыты Фарадея.
8. Из чего состоят выводы Фарадея?
9. От чего зависит величина индукционного тока?
10. Какую ЭДС называют ЭДС индукции?
11. Сформулируйте закон Фарадея для электромагнитной индукции.
12. Как влияет на знак ЭДС индукции изменение потока магнитной индукции?
13. Сформулируйте правило Ленца.
14. Зависит ли знак ЭДС индукции от метода изменения магнитного потока?
15. Какова природа возникновения ЭДС индукции?
16. Какая сила приводит в движение электроны внутри движущегося проводника?
17. Действует ли сила Лоренца на электроны внутри неподвижного проводника?
18. Каково значение явления электромагнитной индукции?



**Содержание:** вихревое электрическое поле; вихревые токи

**Вихревое электрическое поле.** Как было отмечено в предыдущей теме, изменение магнитного поля возбуждает переменное электрическое поле. Силовые линии такого электрического поля не начинаются с какого-то заряда и не заканчиваются на другом, т.е. как силовые линии магнитного поля они нигде не начинаются и не кончаются.

Значит, силовые линии электрического поля, возникающие в результате изменения магнитного поля, — замкнутые линии. Такое электрическое поле имеет вихревой характер.

Таким образом, электроны в неподвижном проводнике, находящиеся в магнитном поле, приводятся в движение вихревым электрическим полем.

Возникает ли вихревое электрическое поле, если нет проводника? Конечно. Любое изменение магнитного поля порождает вихревое электрическое поле. В нашем случае неподвижный проводник служит лишь средством, подтверждающим возникновение этого поля.

В отличие от электростатического поля, вихревое поле не является потенциальным, т.е. работа, совершаемая по перемещению единичного положительного заряда по замкнутому контуру, не равна нулю, а равна ЭДС индукции.

**Вихревые токи.** Индукционный ток возникает не только в линейных проводниках, помещенных в переменное магнитное поле, но и в массивных сплошных проводниках. Эти токи оказываются замкнутыми в толще проводника, и поэтому называются *вихревыми*. Их также называют *токами Фуко*, который изучил их первым. Как и все индукционные токи, направление вихревых токов тоже определяется правилом Ленца, т.е. магнитное поле направлено так, чтобы противодействовать изменению магнитного потока, индуцирующего вихревые токи.

Пусть цельный тяжелый маятник с маленьким сопротивлением двигается в поле электромагнита (рис. 173). Когда электромагнит выключен, маятник совершает практически незатухающие колебания. После включения электромагнита маятник, доходя до электромагнита, испытывает сильное торможение и очень быстро останавливается. Причина этому — появление индукционного тока в маятнике, так как по закону Ленца магнитное поле этого тока препятствует движению маятника. Если теперь в маятнике сделать радиальные вырезы, то вихревые токи ослабятся и торможение почти отсутствует.

Сила индукционного тока зависит от формы движущегося в магнитном поле металлического тела, от свойства материала, из которого оно изготовлено, от скорости изменения магнитного потока.

Тормозящее свойство вихревых токов используется для успокоения стрелок измерительных приборов.

Вихревые токи возникают также и в цельных проводниках, находящихся в переменном магнитном поле и сильно нагревают их. Это его свойство используется в индукционных печах для нагревания и плавки металлов.

В свою очередь, с целью уменьшения вредного действия этого тока (бесполезная трата энергии на нагревание), якоря генераторов и сердечники трансформаторов делают не цельными, а изготавливают из тонких пластин, отделенных друг от друга слоями изоляторов.

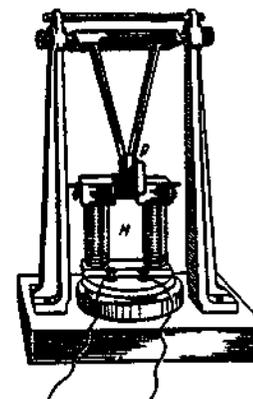


Рис. 173



#### Вопросы для самопроверки

1. Где начинаются и где кончаются силовые линии электрического поля, возникшие в результате изменения магнитного поля?
2. Каков характер силовых линий такого поля?
3. А электрического поля?
4. Существует ли вихревое электрическое поле, если отсутствует неподвижный проводник?
5. Является ли вихревое электрическое поле потенциальным?
6. Чему будет равна работа, совершаемая по перемещению единичного положительного заряда в этом поле?
7. Возникает ли индукционный ток в изолированных проводниках?
8. Какие токи называют вихревыми? Почему их называют еще токами Фуко?
9. Каково направление вихревых токов?
10. Что мешает колебаться маятнику в магнитном поле?
11. От чего зависит сила вихревого тока?
12. Используются ли вихревые токи?
13. Есть ли вредные стороны вихревых токов?
14. Какие принимаются меры, чтобы уменьшить вред от вихревых токов?



**Содержание:** индуктивность; единица индуктивности; индуктивность катушки, самоиндукция, взаимная индукция.

**Индуктивность.** Ток, протекающий через проводимый контур (электрическую цепь), создает вокруг контура магнитное поле и магнитный поток этого поля пропорционален силе тока  $I$ , т.е.

$$\Phi = LI, \quad (105.1)$$

где  $L$  — коэффициент пропорциональности, который называют индуктивностью контура. Индуктивность (от лат. *inductio* — *возбуждать*) — величина, характеризующая только контур, показывает способность контура создавать магнитное поле и абсолютно не зависит от протекающего тока. Здесь индуктивность похожа на электрическую емкость уединенного проводника. Если электрическая емкость проводника характеризует его свойство накапливать электрические заряды, индуктивность характеризует свойство контура создавать при протекании электрического тока магнитное поле.

**Единица индуктивности.** Единицей индуктивности в СИ является генри (Гн), названный так в честь американского физика Г. Генри (1797—1878). Из выражения (105.1) определим индуктивность:

$$L = \frac{\Phi}{I}, \quad (105.2)$$

$$[L] = \frac{[\Phi]}{[I]} = \frac{1 \text{ Вб}}{1 \text{ А}} = 1 \text{ Гн.}$$

1 Гн — индуктивность такого контура, когда по нему течет магнитный ток самоиндукции, который при токе 1 А равен 1 Вб.

**Индуктивность катушки.** Как было отмечено выше, индуктивность зависит от геометрической формы и размеров контура. В частности, индуктивность соленоида, находящегося в вакууме длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$ , равна:

$$L_0 = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}, \quad (105.3)$$

где  $N$  — полное число витков в соленоиде,  $\mu_0$  — магнитная постоянная. Если примем во внимание, что объем соленоида равен  $V = l \cdot S$  и введем понятие числа витков, приходящихся на

единицу длины  $n = \frac{N}{l}$ , то индуктивность соленоида можно записать в виде

$$L_0 = \mu_0 n^2 \cdot V. \quad (105.4)$$

Если в соленоид ввести железный сердечник, его индуктивность возрастет во много раз.

**Магнитной проницаемостью среды** называют величину, определяемую отношением индуктивности контура в однородной среде  $L$  к индуктивности контура в вакууме  $L_0$ :

$$\mu = \frac{L}{L_0}. \quad (105.2)$$

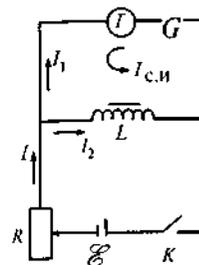


Рис. 174

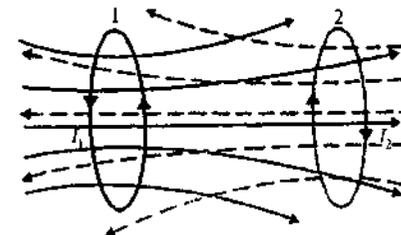


Рис. 175

Нам известно, что величина, характеризующая магнитные свойства веществ — магнитная проницаемость — безразмерная величина.

**Самоиндукция.** Рассмотрим цепь, состоящую из батареи  $E$ , реостата  $R$ , катушки индуктивности  $L$ , гальванометра  $G$  и ключа  $K$  (рис. 174).

Если цепь замкнута, то через гальванометр и катушку индуктивности течет ток. При размыкании ключа стрелка гальванометра резко отклонится в противоположном направлении. Причиной этому является тот факт, что при размыкании ключа уменьшается магнитный поток в соленоиде и в нем возникает ЭДС самоиндукции. Согласно закону Ленца ЭДС самоиндукции поддерживает уменьшение магнитного потока, т.е. его направление совпадает с направлением уменьшающегося тока  $I_2$ . Этот ток будет идти через гальванометр, и так как его направление противоположно направлению тока  $I_1$ , естественно стрелка гальванометра отклонится в обратную сторону. Явлением самоиндукции называют возникновение ЭДС индукции в цепи при изменении в ней силы тока.

Явление самоиндукции является частным случаем явления электромагнитной индукции, т.е. в результате изменения в контуре собственного магнитного потока возникает ЭДС самоиндукции:

$$\mathcal{E}_{\text{с.и}} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (105.6)$$

Если учесть (105.1) и вынести индуктивность  $L$  за знак дифференциала, то получим

$$\mathcal{E}_{\text{с.и}} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (105.6)$$

Из этого выражения видно, что ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения тока в цепи.

**Взаимная индукция.** Если катушку 2 поднести к катушке 1, по которой течет переменный ток, то в катушке 2 возбуждается индуцированная ЭДС (рис. 175). Причиной этому является то, что в ре-

зультате протекания по катушке 1 переменного тока возникающее переменное магнитное поле создает вихревое электрическое поле и это поле в свою очередь создает во второй катушке ЭДС индукции. В результате ЭДС индукции во второй катушке будет равна:

$$\mathcal{E}_{21} = - \frac{d\Phi_{21}}{dt}, \quad (105.8)$$

где  $\Phi_{21}$  — часть потока магнитной индукции, которая создается магнитным полем тока  $I_1$  и пронизывает площадь поверхности, охватываемой контуром 2.

Магнитный поток  $\Phi_{21}$  пропорционален силе тока  $I_1$  в контуре:

$$\Phi_{21} = L_{21} I_1, \quad (105.9)$$

где  $L_{21}$  — коэффициент взаимной индукции.

Точно так же, когда по второй катушке течет переменный ток, в первой катушке возникает ЭДС взаимной индукции

$$\mathcal{E}_{12} = - \frac{d\Phi_{12}}{dt}, \quad (105.10)$$

$$\Phi_{12} = L_{12} I_2, \quad (105.11)$$

Расчеты показывают, что  $L_{21} = L_{12}$  и их называют *коэффициентом взаимной индуктивности контуров*.

**Явлением взаимной индукции называют явление возникновения ЭДС индукции во втором контуре в результате изменения тока в первом контуре.**

Если контуры состоят из катушек с количеством витков  $N_1$  и  $N_2$  (рис. 176), то взаимная индуктивность определяется следующим образом:

$$L_{12} = L_{21} = \mu_0 \mu \frac{N_1 N_2}{l} \cdot S.$$



**Вопросы для самопроверки**

1. Чему равен поток магнитного поля вокруг проводника? 2. Что такое индуктивность? 3. Что означает слово индуктивность? 4. Зависит ли индуктивность от силы тока, протекающего по контуру? 5. Какое свойство контура характеризует индуктивность? 6. Какова единица индуктивности в СИ и какая это индуктивность? 7. Зависит ли индуктивность от размеров и формы контура? 8. Чему равна индуктивность соленоида в вакууме? 9. Что показывает магнитная проницаемость среды? 10. Какое явление называют самоиндукцией? 11. Чему равна ЭДС самоиндукции? 12. Как можно наблюдать явление самоиндукции? 13. Как возникает ЭДС самоиндукции? 14. Какое явление называют взаимной индукцией? 15. Как возникает ЭДС во втором контуре? 16. Чему равна ЭДС самоиндукции? 17. Чему равна взаимная индуктивность контуров?

**Содержание:** для чего нужен трансформатор? устройство трансформатора; принцип работы трансформатора; коэффициент трансформации.

**Для чего нужен трансформатор?** Обычно электрическую энергию необходимо передавать от электростанции к потребителям. При передаче электрической энергии на многие сотни километров имеет важное значение уменьшение бесполезной потери энергии. При этом значительная часть энергии превращается в тепловую и энергию магнитного поля. Обе эти энергии пропорциональны квадрату силы тока. Именно поэтому при передачи на большие расстояния уменьшают силу тока и повышают напряжение.

При этом энергия электрического тока остается постоянной. Дошедшие до потребителя сила тока и напряжение по необходимости снова изменяют.

*Трансформатором* называют устройство, которое изменяет силу тока и напряжение.

На явлении взаимной индукции основано действие трансформатора, который применяется для повышения и понижения напряжения переменного тока.

**Устройства трансформатора.** Трансформаторы впервые были сконструированы и введены в практику русскими учеными П. Яблочковым (1847—1894) и И. Усагиным (1855—1919). Принципиальная схема трансформатора показана на рисунке 176, который состоит из двух катушек с числом витков  $N_1$  и  $N_2$ , соответственно закрепленных на замкнутом железном сердечнике.

Концы первичной обмотки присоединены к источнику переменного тока с ЭДС  $\mathcal{E}_1$ , где возникает переменный ток  $I_1$ , создающий в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток  $\Phi$ . Изменение этого потока вызывает во вторичной обмотке ЭДС взаимной индукции.

**Принцип работы трансформатора.** Для первой обмотки закон Ома имеет следующий вид:

$$\mathcal{E}_1 = \frac{d}{dt} (N_1 \Phi) - I_1 R_1,$$

где  $R_1$  — сопротивление первичной обмотки. Падение напряжения  $I_1 R_1$  на сопротивлении  $R_1$  при быстропеременных полях мало по сравнению с каждой из двух ЭДС, поэтому

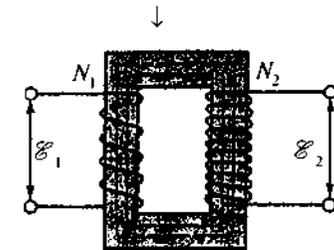


Рис. 176

$$\mathcal{E}_1 \approx N_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (106.1)$$

ЭДС взаимной индукции, возникающая во вторичной обмотке

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{d(N_2\Phi)}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (106.2)$$

Из обоих выражений найдем  $\frac{d\Phi}{dt}$ :

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\mathcal{E}_1}{N_1}; \quad \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{\mathcal{E}_2}{N_2}$$

и приравняв их, находим:

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{N_2}{N_1} \mathcal{E}_1. \quad (106.3)$$

**Коэффициент трансформации.** Коэффициентом трансформации называют отношение числа витков  $\frac{N_2}{N_1}$ , показывающее во сколько раз ЭДС во вторичной обмотке трансформатора больше (или меньше) чем в первичной.

В современных трансформаторах потеря энергии не превышает двух процентов. Эта энергия тратится на выделение тепла и появление вихревых токов. Если не принимать в расчет бесполезную трату энергии, то мощность тока в обеих обмотках трансформатора практически одинакова:

$$\mathcal{E}_2 I_2 = \mathcal{E}_1 I_1. \quad (106.4)$$

Учитывая соотношение (106.3), найдем

$$\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}, \quad (106.5)$$

т.е. токи в обмотках обратно пропорциональны числу витков в этих обмотках.

Если  $\frac{N_2}{N_1} > 1$ , то такой трансформатор называют **повышающим трансформатором**. Он увеличивает переменную ЭДС, и понижает силу тока. Такие трансформаторы применяются для передачи электроэнергии на большие расстояния.

Если  $\frac{N_2}{N_1} < 1$ , то трансформатор будет понижающим и ЭДС уменьшается, а сила тока повышается. Такие трансформаторы используются для приема тока высокого напряжения и обеспечения ими потребителей.



Рис. 177

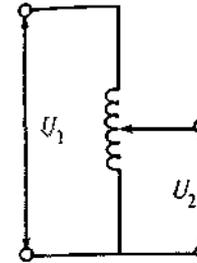


Рис. 178

Схема передачи электрической энергии приведена на рисунке 177.

**Применение трансформаторов.** Мы рассматривали трансформаторы, имеющие только две обмотки. Однако трансформаторы, используемые в радиотехнике, имеют 4—5 обмоток. Трансформатор, состоящий из одной обмотки, называется *автотрансформатором* (рис. 178). Здесь одна часть обмотки выполняет функцию второй обмотки. Трансформаторы в процессе работы нагреваются, поэтому они имеют систему охлаждения. Система охлаждения бывает воздушной и масляной.

Мощность современных трансформаторов достигает  $10^9$  Вт, а ЭДС доходит до 750 кВ. Такие трансформаторы бывают очень большими и весят несколько сот тонн. КПД их достигает 99 %.



#### Вопросы для самопроверки

1. Для чего нужен трансформатор?
2. Какое устройство называют трансформатором?
3. На чем основан принцип работы трансформатора?
4. Кем был сконструирован первый трансформатор?
5. Как устроен трансформатор?
6. В чем заключается принцип работы трансформатора?
7. Как связаны ЭДС в обмотках?
8. Что называют коэффициентом трансформации?
9. Что показывает коэффициент трансформации?
10. Равны ли энергии в обмотках трансформатора?
11. Зависит ли сила тока от количества витков?
12. Какой трансформатор называют повышающим?
13. Для каких целей используется повышающий трансформатор?
14. Какой трансформатор называют понижающим?
15. Для каких целей используется понижающий трансформатор?
16. Объясните схему электропередачи.
17. Из скольких обмоток состоит трансформатор?
18. Какие трансформаторы называют автотрансформаторами?
19. Может ли в трансформаторах энергия тратиться впустую и сколько процентов это составляет?
20. Для чего нужна система охлаждения?
21. Какими могут быть мощности трансформаторов?



Содержание: энергия магнитного поля; объемная плотность энергии.

**Энергия магнитного поля.** Вокруг проводника, по которому течет ток, всегда возникает магнитное поле. Это магнитное поле появляется вместе с током и вместе с ним исчезает. Магнитное поле, как и электрическое, является носителем энергии. Естественно, что энергия магнитного поля равна работе, которая затрачивается током на создание этого поля:

$$W = \frac{LI^2}{2}, \quad (107.1)$$

где:  $I$  — сила тока в контуре,  $L$  — индуктивность контура.

Следует отметить, что энергия магнитного поля локализована в пространстве. Поэтому ее можно представить как функцию величин, характеризующих это поле в окружающем пространстве. Для этого рассмотрим частный случай — однородное магнитное поле внутри длинного соленоида.

**Объемная плотность энергии.** Если в формулу (107.1) подставим значение индуктивности соленоида  $L = \mu_0 \mu \frac{N^2}{l} S$  длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$ , то получим

$$W = \frac{1}{2} \mu_0 \mu \frac{N^2 I^2}{l} \cdot S. \quad (107.2)$$

Из выражения для индукции магнитного поля соленоида

$B = \frac{\mu_0 \mu NI}{l}$ , и учитывая, что  $I = \frac{Bl}{\mu_0 \mu N}$  и  $B = \mu_0 \mu H$ , получим

$$W = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0 \mu} V = \frac{B \cdot H}{2} V, \quad (107.3)$$

где  $V = l \cdot S$  — объем соленоида. Магнитное поле соленоида однородно, сосредоточено внутри соленоида и имеет постоянную объемную плотность:

$$w = \frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{B \cdot H}{2}. \quad (107.4)$$

Выражение (107.4) для объемной плотности энергии магнитного поля имеет вид для объемной плотности энергии электростатического поля, только здесь вместо величин, характеризую-

щих электрическое поле, стоят величины характеризующие магнитное поле. Хотя это выражение выведено для однородного поля, оно справедливо и для неоднородных полей.



### Вопросы для самопроверки

1. Сохраняется ли энергия магнитного поля, когда прекращается ток?
2. Совершается ли работа для возбуждения магнитного поля?
3. Равна ли совершенная работа энергии магнитного поля?
4. Чему равна энергия магнитного поля проводника с током?
5. Где сосредоточена энергия магнитного поля?
6. Чему равна энергия магнитного поля соленоида?
7. Чему равна объемная плотность энергии магнитного поля?



### Образцы решения задач

**Задача 1.** Найти ЭДС индукции в проводнике длиной 15 см, перемещающегося в однородном магнитном поле с индукцией 0,2 Тл со скоростью 15 м/с перпендикулярно силовым линиям поля.

**Дано:**

$$l = 15 \text{ см} = 0,15 \text{ м};$$

$$V = 0,2 \text{ Т};$$

$$v = 15 \text{ м/с}.$$

$$\mathcal{E}_i = ?$$

**Решение.** На основании закона Фарадея для электромагнитной индукции

$$\mathcal{E}_i = \frac{d\Phi}{dt}.$$

Магнитный поток через поверхность проводника  $S = l \cdot x$ :

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha = Bl \cdot x.$$

Здесь, из условия задачи  $\alpha = 0$  и  $\cos = 1$ . Таким образом, выражение для ЭДС индукции:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d(B \cdot l \cdot x)}{dt} = -B \cdot l \frac{dx}{dt} = -Bl \cdot v.$$

Подставив значение величин, получим следующее:

$$\mathcal{E}_i = -0,2 \cdot 0,15 \cdot 15 = -0,45 \text{ В}.$$

Ответ:  $\mathcal{E} = -0,45 \text{ В}.$

**Задача 2.** При каком значении силы тока энергия магнитного поля будет равна 100 мкДж. Индуктивность катушки 0,1 мГн.

Дано:

$$L = 0,1 \text{ мГн} = 10^{-4} \text{ Гн};$$

$$W = 100 \text{ мДж} = 10^{-4} \text{ Дж}.$$

$$I = ?$$

**Решение:** Энергия магнитного поля тока  $I$  через катушку индуктивностью  $L$  находится с помощью выражения:

$$W = \frac{1}{2} LI^2.$$

Из этого выражения найдем силу тока  $I = \sqrt{\frac{2W}{L}}$ .

При помощи данных находим:  $I = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-4}}{10^{-4}}} \text{ А} = 1,41 \text{ А}.$

Ответ:  $I = 1,41 \text{ А}.$



### Задачи для самостоятельного решения

1. Поперечное сечение соленоида, содержащего 1000 витков, —  $10 \text{ см}^2$ . По обмотке протекает ток, возбуждающий индукцию 1,5 Тл. Найти среднее значение ЭДС самоиндукции в соленоиде, если ток за 500 мкс убывает до нуля. ( $\langle \mathcal{E} \rangle = 3 \text{ кВ}$ )

2. Прямой проводник длиной 40 см перемещается в однородном магнитном поле со скоростью 5 м/с перпендикулярно линиям магнитной индукции. Найти индукцию магнитного поля, если разность потенциалов на концах провода 0,6 В. ( $B = 0,3 \text{ Тл}$ .)

3. Какой должна быть скорость изменения магнитного потока, чтобы в соленоиде возбудить ЭДС индукции 120 В; количество витков в соленоиде равно 2000. ( $\frac{d\Phi}{dt} = 60 \frac{\text{мВб}}{\text{с}}$ )

4. Найти энергию магнитного поля соленоида, в котором при силе тока 10 А возникает магнитный поток 0,5 Вб. ( $W = 2,5 \text{ Дж}$ )

### Тестовые вопросы

1. Каким явлением называют возникновение ЭДС индукции в цепи в результате изменения тока в этой же цепи?

- А. Индукция. В. Индуктивность. С. Самоиндукция.  
 Д. Магнитный поток. Е. Правильного ответа нет.

2. Из приведенных выражений покажите выражение для закона электромагнитной индукции:

А.  $\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ . В.  $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$ . С.  $\mathcal{E} = \frac{A}{q}$ . Д.  $\mathcal{E} = \frac{I}{R+r}$ .

Е.  $\mathcal{E} = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha$ .

3. В электрической цепи трансформатор;  
 1) используется в качестве выпрямителя;  
 2) используется в качестве преобразователя;  
 3) для преобразования напряжения переменного тока;  
 4) для преобразования силы переменного тока.  
 А. 3; 4. В. 1. С. 2. Д. 2; 3. Е. 3.

4. Среди приведенных формул укажите формулу энергии магнитного поля:

А.  $W = \frac{LI^2}{2}$ . В.  $W = q \cdot E \cdot d$ . С.  $\omega = \frac{W}{V}$ .

Д.  $W = \frac{CU^2}{2}$ . Е.  $\omega = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2}$ .

### Основные выводы

Явлением *электромагнитной индукции* называют возникновение электрического тока в результате изменения потока индукции магнитного поля через замкнутый контур.

**Закон Фарадея для электромагнитной индукции:** Какова бы ни была причина изменения потока магнитной индукции, охватываемая замкнутым контуром, возникающая в контуре ЭДС индукции определяется следующим образом:  $\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$ .

Индуктивность контура определяется из  $L = \frac{\Phi}{I}$ . Единица индуктивности в СИ — 1 Гн.

Индуктивность катушки  $L_0 = \mu_0 n^2 V$ .

Явлением *самоиндукции* называют возникновение ЭДС индукции в цепи при изменении в нем силы тока.

Явлением *взаимной индукции* называют явление возникновения ЭДС индукции во втором контуре в результате изменения тока в первом контуре.

*Трансформатором* называют устройство, которое изменяет силу тока и напряжение.

Если  $\frac{N_2}{N_1} > 1$ , то трансформатор называют *повышающим*, если  $\frac{N_2}{N_1} < 1$  — *понижающим*.

Энергия магнитного поля  $W = \frac{LI^2}{2} = \frac{B \cdot H}{2} \cdot V$ .

Объемная плотность энергии  $w = \frac{W}{V} = \frac{B \cdot H}{2}$ .



Колебательное движение — это свойство, присущее всем явлениям в природе. Все макротела во Вселенной: звезды, Солнце, планеты и др.; в природе: времена года, месяцы, день и ночь и др; микротела: молекула, атом, ядро, электроны и др; в живом организме: обращение крови, биение сердца и др. находятся в постоянном колебательном движении. Поэтому колебательное движение достойно столь тщательного изучения. Мы знакомы с механическими колебаниями. Теперь же познакомимся с электромагнитными колебательными процессами, составляющими суть современной техники.

Сначала мы видели образование вокруг неподвижного заряда электростатического поля, затем вокруг движущегося заряда (электрического тока) магнитного поля. Явление электромагнитной индукции показало, что изменение магнитного поля привело к появлению вихревого электрического поля. В данной главе рассмотрим, какие еще отношения существуют между электрическим и магнитным полями.



### 108. Свободные электромагнитные колебания

**Содержание:** свободные электромагнитные колебания; уравнение электромагнитных колебаний; характеристики электромагнитных колебаний; напряжение и ток в колебательном контуре; превращение энергии в колебательном контуре.

**Свободные электромагнитные колебания.** Электромагнитными колебаниями называют взаимосвязанное, периодическое изменение зарядов, токов, напряженности электрического и магнитного полей.

Свободными электромагнитными колебаниями называются колебания, происходящие без внешнего воздействия за счет первоначально накопленной энергии.

**Уравнение электромагнитного колебания.** Пусть имеется закрытый колебательный контур, состоящий из индуктивности  $L$  и емкости  $C$  (рис. 179). Для возбуждения в контуре колебаний конденсатору нужно сообщить заряд. Для этого ключ переводится в положение 1. При переводе ключа в положение 2 конденсатор начнет разряжаться (т.е. отдает заряд) и ток, который потечет по катушке, возбудит в ней ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_{са} = -L \frac{dI}{dt}$ . Если не учитывать потерю энергии, она будет равна напряжению на обкладках конденсатора, т.е.

$$-L \frac{dI}{dt} = \frac{q}{C}$$

или если учтем, что  $I = \frac{dq}{dt}$ , получим уравнение

$$-L \frac{d^2q}{dt^2} = \frac{q}{C}$$

или

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC} q = 0. \quad (108.1)$$

Это выражение есть уравнение электромагнитных колебаний. В этом выражении

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \quad (108.2)$$

и величина, совершающая колебательное движение  $q$  есть количество заряда. Тогда уравнение электромагнитного колебания примет вид

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0. \quad (108.3)$$

**Характеристики электромагнитного колебания.** Так как уравнение электромагнитного колебания похоже на дифференциальное уравнение гармонических колебаний, его решение принимает вид

$$q = q_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (108.4)$$

где  $q_0$  — максимальный заряд на обкладках конденсатора. Циклическую частоту  $\omega_0$  собственных колебаний контура можно найти из (108.2):

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (108.5)$$

Период колебания определяется формулой Томсона

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (108.6)$$

**Напряжение и ток в колебательном контуре.** Не только заряд на обкладках конденсатора, но и напряжение и ток в контуре изменяются по гармоническому закону:

$$U = \frac{q}{C} = \frac{q_0}{C} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (108.7)$$

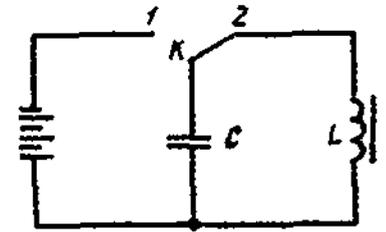


Рис. 179

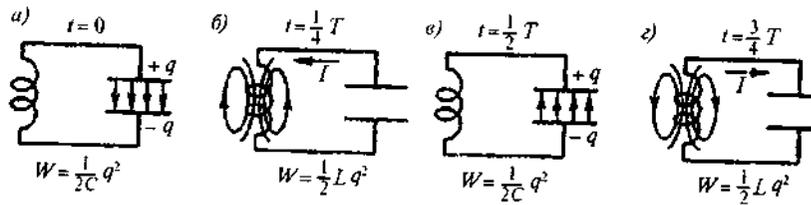


Рис. 180

$$I = \frac{dq}{dt} = q_0 \omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = I_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (108.8)$$

где  $U_0 = \frac{q_0}{C}$  — амплитуда напряжения,  $I_0 = q_0 \omega_0$  — амплитуда тока. Сравнивая выражения (108.4), (108.7), (108.8), можно увидеть, что колебания тока опережают по фазе колебания заряда и напряжения на угол  $\frac{\pi}{2}$ .

Значит, когда ток достигает своего максимального значения, заряд и напряжение на обкладках конденсатора обращаются в нуль и наоборот.

**Превращения энергии в колебательном контуре.** Когда конденсатор заряжается, то между его обкладками возникает электрическое поле с энергией

$$W_э = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}. \quad (108.9)$$

Когда же конденсатор разряжается через катушку индуктивности, возникает магнитное поле с энергией

$$W_м = \frac{LI^2}{2}. \quad (108.10)$$

В идеальном контуре максимальная энергия электрического поля будет равна максимальной энергии магнитного поля и эти энергии превращаются друг в друга (рис. 180):

$$\frac{CU_0^2}{2} = \frac{LI_0^2}{2}. \quad (108.11)$$

Энергия конденсатора изменяется согласно следующему закону:

$$W_э = \frac{CU_0^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \frac{q_0^2}{2C} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (108.12)$$

Если учесть, что  $\omega^2 = \frac{1}{LC}$ , то для энергии электрического поля получим выражение

$$W_э = \frac{\omega_0^2 L q_0^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (108.13)$$

Также энергия магнитного поля в катушке индуктивности

$$W_м = \frac{LI_0^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \frac{\omega_0^2 L_m q_0^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (108.14)$$

Здесь учли, что  $I_0 = q_0 \omega_0$ .

Чтобы найти полную энергию электромагнитного поля, надо сложить (108.13) и (108.14):

$$W = W_э + W_м = \frac{1}{2} \omega_0^2 L q_0^2. \quad (108.15)$$

Из результата видно, что полная энергия — постоянная величина и сохраняется, т.е. электромагнитные колебания не затухают.



### Вопросы для самопроверки

1. Какие движения называются колебательными движениями? 2. В чем причина такого пристального внимания к колебательному движению? 3. Какие колебания называют электромагнитными колебаниями? 4. А свободными электромагнитными колебаниями? 5. Какую цепь называют закрытым колебательным контуром? 6. Что происходит в катушке индуктивности при разрядке конденсатора? 7. Равна ли ЭДС самоиндукции напряжению на конденсаторе? 8. Напишите уравнение электромагнитного колебания. 9. Какая величина совершает колебательное движение при электромагнитном колебании? 10. Чему равна частота колебаний? 11. А период колебания? 12. Как меняются сила тока и напряжение в контуре? 13. Есть ли разница между фазами силы тока и напряжения? 14. Когда сила тока достигает своего максимального значения? 15. А напряжение? 16. Чему равна энергия конденсатора? 17. А энергия поля вокруг катушки? 18. В каких отношениях они между собой? 19. Чему равна полная энергия? 20. Как меняется полная энергия?



**Содержание:** автоколебания; генератор незатухающих колебаний.

**Автоколебания.** Огромный интерес для техники представляет возможность поддерживать незатухающие колебания. Если восполнять потерю энергии реальной колебательной системы, то колебания станут незатухающими. Автоколебания, обеспечиваемые энергией за счет постоянного внешнего источника незатухающих колебаний в колебательном контуре, очень широко применяются и имеют важное значение. Причем, свойства этих колебаний определяются самой системой.

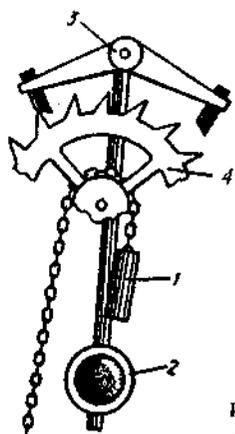


Рис. 181

Теперь рассмотрим систему, состоящую из источника энергии тела, которое может совершать колебательное движение, устройства передающего энергию из источника к телу. Эта система имеет свойство управлять компенсацией потерянной телом энергии за счет трения, тепловой энергии, излучения и др. Принцип работы маятниковых часов приведен на рисунке 181. В таких часах источником энергии служит сжатая пружина или поднятый вверх груз (1), маятник (2), выполняющий роль колебательной системы и, наконец, устройство (3), управляющее передачей энергии из источника к телу. Система имеет запас потенциальной энергии сжатой пружины или поднятого груза. Подвешенный груз приводит в движение зубчатое колесо (4). Оно же при помощи устройства (3) заставляет колебаться маятник то в одну, то в другую сторону. В результате возникает незатухающее колебание (ход часов) маятника. Если трение очень маленькое, частота колебания маятника будет равна частоте свободных колебаний, рассмотренная система же называется *автоколебательной системой*.

Автоколебательная система состоит из следующих основных частей (рис. 182):

1) колебательная система; 2) источник энергии, восполняющий потерю энергии в колебательной системе; 3) клапан — устройство, управляющее поступлением энергии определенными порциями в колебательную систему; 4) обратная связь, управляющая клапаном колебательной системы.

**Генератор незатухающих колебаний.** Функцию таких колебательных систем выполняет контур, состоящий из индуктивности ( $L$ ) с маленьким сопротивлением и конденсатор ( $C$ ). Батарея (выпрямитель), обеспечивающая транзистор напряжением, выполняет функцию источника тока. Функцию клапана выполняет транзистор: он управляет поступлением энергии порциями в колебательный контур (рис. 182).

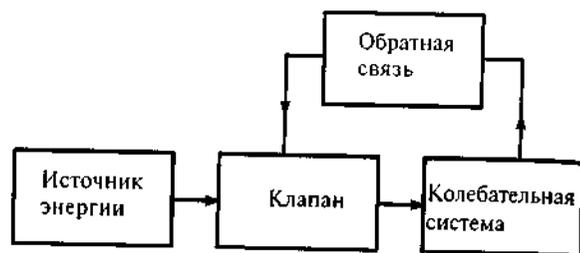


Рис. 182

Катушка обратной связи  $L_{o.c.}$ , связанная с катушкой  $L$  колебательного контура, индуктивно служит для появления колебаний (рис. 183). Роль клапана выполняет транзистор  $p-n-p$ . Если положительный полюс источника соединен с эмиттером, а отрицательный — с базой, то эмиттерный переход будет открыт. Если потенциал базы будет положительным относительно эмиттера, транзистор не пропускает ток. Именно от отношения этих потенциалов зависит, будет ли транзистор „открытым” или „закрытым”.

Если ключ закрывается, в цепи транзистора появится ток и будет заряжать конденсатор в колебательном контуре. Ток, протекающий по катушке  $L$ , индуцирует на катушке обратной связи  $L_{o.c.}$  переменное напряжение, которое подается на эмиттер. В первом полупериоде транзистор будет открыт, т.е. через коллекторную цепь транзистора течет ток. Направление этого тока в катушке контура. Во втором же полупериоде направление тока в контуре изменяется, транзистор „закрывается” и колебательный контур в течение полупериода отсоединяется от источника энергии. В следующем периоде процесс повторяется. Таким образом, транзистор соединяет и отсоединяет источник постоянного тока, обеспечивающий энергией незатухающие колебания в контуре.

Амплитуда и период колебаний определяются характеристиками колебательной системы.

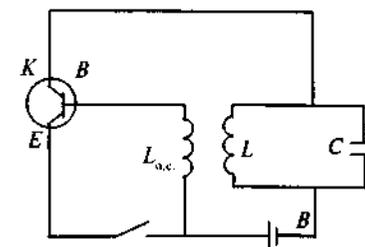


Рис. 183



#### Вопросы для самопроверки

1. Что нужно сделать, чтобы колебания не затухали? 2. Какие колебания называют автоколебаниями? 3. Похожа ли система часов на систему автоколебаний? 4. Объясните принцип работы часов. 5. Из каких частей состоит система автоколебаний? 6. Как устроена система незатухающих электромагнитных колебаний? 7. Какую роль в таком контуре выполняет транзистор? 8. В чем суть принципа работы системы незатухающих электромагнитных колебаний? 9. Какой потенциал управляет транзистором? 10. В чем суть процесса образования электромагнитных колебаний?

## 110. Вынужденные электромагнитные колебания. Резонанс

**Содержание:** уравнение вынужденных колебаний; решение уравнения вынужденных колебаний; резонанс.

**Уравнение вынужденных колебаний.** Чтобы в реальной колебательной системе получить незатухающие колебания, надо компенсировать потери энергии.

Вынужденными электромагнитными колебаниями называются колебания, возникающие под действием внешнего периодически изменяющегося ЭДС.

Значит, чтобы возникали вынужденные электромагнитные колебания, к колебательному контуру надо подводить во внешнюю периодически изменяющуюся по гармоническому закону ЭДС или переменное напряжение

$$U = U_0 \sin \omega t, \quad (110.1)$$

где  $U_0$  — максимальное значение напряжения,  $\omega$  — циклическая частота.

Тогда уравнение вынужденных колебаний можно написать следующим образом (см. (110.1)):

$$L \frac{dI}{dt} + IR + \frac{q}{C} = U_0 \sin \omega t. \quad (110.2)$$

Если учесть, что  $I = \frac{dq}{dt}$ ,  $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$ ,  $\delta = \frac{R}{2L}$ ,

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\delta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{U_0}{L} \sin \omega t. \quad (110.3)$$

(110.3) есть уравнение вынужденных электромагнитных колебаний.

**Решение уравнения вынужденных колебаний.** Решение уравнения (110.3) имеет следующий вид:

$$q = q_0 \sin(\omega t + \varphi). \quad (110.4)$$

Амплитуда колебаний

$$q_0 = \frac{U}{\omega \sqrt{R^2 + \left[ L\omega - \frac{1}{\omega C} \right]^2}} \quad (110.5)$$

и фаза

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R}{\frac{1}{\omega C} - \omega L} \quad (110.6)$$

определяются на основании условий.

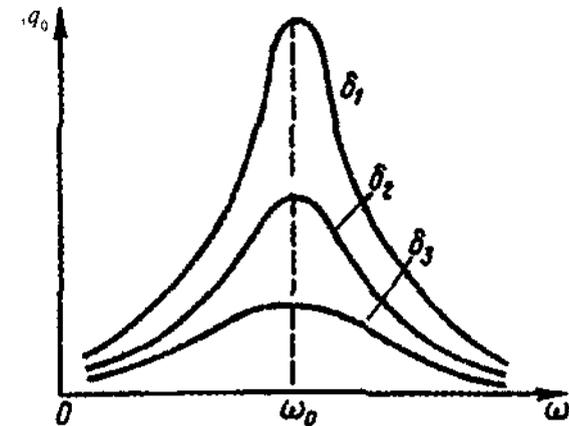


Рис. 184

Силу тока в контуре находим дифференцируя выражение (110.4):

$$I = \frac{dq}{dt} = \omega q_0 \cos(\omega t + \alpha). \quad (110.7)$$

Сравнение (110.4) и (110.7) показывает, что колебания заряда (напряжения) и тока сдвинуты относительно друг друга на  $\frac{\pi}{2}$ .

**Резонанс.** При приближении частоты  $\omega$ , вынуждающей ЭДС к собственной частоте колебаний  $\omega_0$  контура, амплитуда вынужденных колебаний резко возрастает. В идеальном контуре при  $\omega = \omega_0$  частота вынужденного колебания будет самой большой и стремиться к бесконечности. В реальных контурах амплитуда достигает своего наибольшего значения при частотах, меньших  $\omega_0$ .

Резонансом называют резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты  $\omega$  вынужденного колебания к собственной частоте  $\omega_0$  колебания системы.

На рисунке 184 приведены резонансные кривые при различных значениях коэффициента затухания ( $\delta_3 > \delta_2 > \delta_1$ ).

Из рисунка видно, что с увеличением коэффициента затухания линии проходят ниже. Значит, колебательная система с меньшим коэффициентом затухания при резонансе потребляет больше энергии, чем система с большим коэффициентом затухания.



### Вопросы для самопроверки

1. Какие колебания называют вынужденными электромагнитными колебаниями? 2. Какое напряжение надо подавать контуру, чтобы возникло вынужденное электромагнитное колебание? 3. Из чего состоит уравнение вынужденного колебания? 4. Каково решение уравне-

ния вынужденных колебаний? 5. Напишите закон вынужденного колебания. 6. Являются ли вынужденные колебания гармоническими? 7. Что такое амплитуда колебаний? 8. Что такое фаза колебаний? 9. Как меняется сила тока в контуре? 10. Совпадают ли фазы силы тока и напряжения в контуре? 11. Что называют резонансом? 12. Какое влияние оказывает на кривую резонанса коэффициент затухания?

## § 111. Переменный ток. Генератор переменного тока

**Содержание:** переменный ток; генератор переменного тока; электродвигатель.

**Переменный ток.** Переменным током называют ток, изменяющийся со временем силу и направление. У переменного тока направление и сила меняются. В общем, когда говорят о переменном токе, то понимают периодический ток, у которого среднее значение силы тока и напряжения за один период равно нулю.

Электромагнитные колебания, установившиеся в контуре, можно рассматривать в качестве переменного тока. Переменный ток изменяется по гармоническому закону.

Время, затраченное на совершение одного полного колебания переменного ЭДС, называют *периодом*  $T$  переменного тока.

Полное число колебаний за одну секунду называют *частотой* ( $\nu$ ) переменного тока. Например, частота используемого в народном хозяйстве тока  $\nu = 50$  Гц. Значит, этот ток изменяет свое направление за одну секунду 100 раз. Между обычной частотой  $\nu$  и циклической круговой частотой  $\omega$  существует следующее отношение:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}. \quad (111.1)$$

**Генератор переменного тока.** Генератором переменного тока называют устройство, превращающее различные виды энергии в электрическую энергию. Для превращения механической энергии в электрическую пользуются явлением электромагнитной индукции. Для понимания этого процесса рассмотрим плоскую рамку, вращающуюся в однородном магнитном поле (рис. 185). Рамка в однородном магнитном поле ( $B = \text{const}$ ) вращается равномерно с угловой скоростью. Магнитный поток, увлекаемый рамкой площадью  $S$ , определяется выражением:

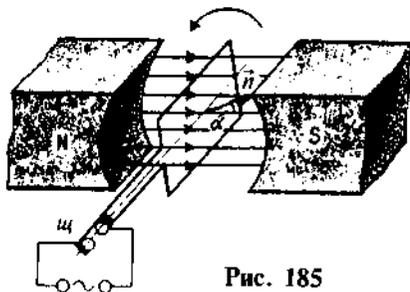


Рис. 185

$$\Phi = B_n \cdot S = B \cdot S \cdot \cos \alpha = B \cdot S \cdot \cos \omega t,$$

где  $\alpha = \omega t$  —  $t$  — угол поворота рамки (в начале отсчета при  $t = 0$ ;  $\alpha = 0$ ). При вращении рамки возникает переменная ЭДС индукции:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin \omega t, \quad (111.2)$$

при  $\sin \omega t = 1$ ,  $\mathcal{E}_i$  достигает своего максимального значения:

$$\mathcal{E}_{\max} = BS\omega. \quad (111.3)$$

Из выражения (111.3) видно, что максимальное значение ЭДС индукции ( $\mathcal{E}_{\max}$ ) зависит от  $\omega$ ,  $B$  и  $S$ . Повторимся, что в народном хозяйстве Узбекистана используется стандартный ток частотой  $\nu = \omega/2\pi = 50$  Гц.

Значит, чтобы повысить  $\mathcal{E}_{\max}$ , надо увеличить значения  $B$  и  $S$ . С целью увеличения используются мощные постоянные магниты или сердечники с большой магнитной проницаемостью. Чтобы увеличить  $S$ , используется не один, а несколько последовательно соединенных витков. Переменное напряжение снимается с щеток, на рис. 185 оно обозначено буквой (щ).

**Электродвигатель.** Мы познакомились с процессом превращения механической энергии в электрическую энергию. Обратное этому процессу, т.е. установки, превращающие электрическую энергию в механическую энергию, называют электродвигателями. Принцип работы электродвигателя следующий. Если через рамку, расположенную в магнитном поле, пропустить электрический ток, на нее будет действовать вращающий момент и рамка начнет вращаться.



### Вопросы для самопроверки

1. Какой ток называют переменным? 2. Что меняется в переменном токе? 3. Чему равно среднее значение силы переменного тока и напряжения за один период? 4. Можно ли рассматривать электромагнитные колебания в контуре в качестве переменного тока? 5. В соответствии с каким законом меняется переменный электрический ток? 6. Какую величину называют периодом переменного тока? 7. А частотой переменного тока? 8. Чему равна частота промышленного тока? 9. Что такое циклическая частота переменного тока? 10. Какие устройства называют генераторами переменного тока? 11. На чем основан принцип работы генератора? 12. Каково устройство генератора переменного тока? 13. Из чего состоит процесс возникновения переменного тока? 14. Что представляет собой магнитный поток, увлекаемый рамкой? 15. Как возникает ЭДС индукции? 16. От чего зависит максимальное значение ЭДС? 17. Какие меры принимаются для увеличения максимального значения ЭДС? 18. Какое устройство называют электродвигателем? 19. Каков принцип работы электродвигателя?



## Активное сопротивление, емкость и индуктивность в цепи переменного тока

Содержание: активное сопротивление в цепи переменного тока, катушка индуктивности в цепи переменного тока; конденсатор в цепи переменного тока.

**Активное сопротивление в цепи переменного тока.** В цепи имеется только сопротивление  $R$ , ( $L \rightarrow 0$ ,  $C \rightarrow 0$ ) и к нему приложено переменное напряжение (рис. 186 а):

$$U = U_m \cos \omega t. \quad (112.1)$$

Мгновенное значение тока через активное сопротивление определяется законом Ома:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_m}{R} \cos \omega t = I_m \cos \omega t \quad (112.2)$$

где

$$I_m = \frac{U_m}{R} \text{ — амплитуда силы тока.}$$

На рисунке 186 б приводится изменение напряжения и силы тока в цепи. Также для более наглядного изображения соотношения между переменным током и напряжением пользуются методом векторных диаграмм. Векторная диаграмма амплитудных значений силы тока  $I_m$  и напряжения  $U_m$  на активном сопротивлении изображена на рисунке 186 в. Разность фаз между  $I_m$  и  $U_m$  равна нулю.

**Катушка индуктивности в цепи переменного тока.** Значит, в цепи имеется только катушка индуктивности  $L$  ( $R \rightarrow 0$ ,  $C \rightarrow 0$ , рис. 187 а).

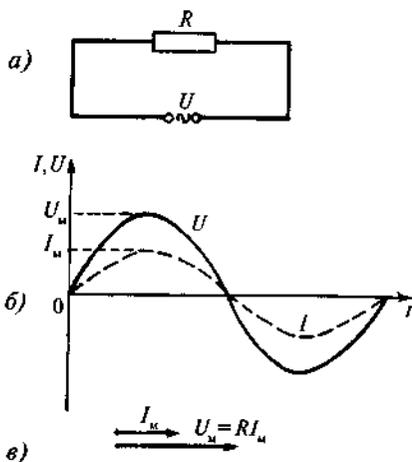


Рис. 186

Если к цепи приложить переменное напряжение в виде (112.1), то по цепи потечет переменный ток и в результате появится ЭДС самоиндукции

$$\mathcal{E}_{\text{с.и.}} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (112.4)$$

Тогда для этого участка закон Ома будет

$$U_m \cdot \cos \omega t - L \frac{dI}{dt} = 0.$$

Отсюда

$$L \frac{dI}{dt} = U_m \cdot \cos \omega t. \quad (112.5)$$

Если учесть, что внешнее напряжение приложено к катушке индуктивности, то падение напряжения на ней будет

$$U_L = \frac{dI}{dt}. \quad (112.6)$$

Из выражения (112.5) определим  $dI$ :

$$dI = \frac{U_m}{L} \cos \omega t \cdot dt.$$

Проинтегрируем это выражение и учитывая, что для случая переменного тока постоянная интегрирования равна нулю, находим:

$$I = \frac{U_m}{\omega L} \sin \omega t = \frac{U_m}{\omega L} \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) = I_m \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (112.7)$$

где

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}. \quad (112.8)$$

Если это выражение сравним с законом Ома, то найдем, что величина, стоящая в знаменателе, есть сопротивление:

$$R_L = \omega L. \quad (112.9)$$

Оно называется *реактивным индуктивным сопротивлением* (или индуктивным сопротивлением). Из выражения (112.9) вытекает, что при  $\omega = 0$  (т.е. при постоянном токе), индуктивное сопротивление равно нулю. Из (112.8) находим  $U_m = \omega L I_m$  и можем определить падение напряжения на индуктивном сопротивлении:

$$U_L = L \frac{dI}{dt} = U_m \cos \omega t = \omega L I_m \cos \omega t. \quad (112.10)$$

Сравнение выражений (112.7) и (112.10) приводит к выводу, что падение напряжения на катушке опережает по фазе ток в катушке на  $\frac{\pi}{2}$  (рис. 187 б). Векторная диаграмма амплитудных значений напряжения и силы тока изображена на рисунке 187 в.

**Конденсатор в цепи переменного тока.** Значит, в цепи имеется только конденсатор емкостью  $C$ :  $R \rightarrow 0$ ,  $L \rightarrow 0$  (рис. 188 а). Если к цепи приложить переменное напряжение в виде (112.1), конденсатор будет все время перезаряжаться и в цепи потечет переменный ток:

$$\frac{q}{C} = U_c = U_m \cos \omega t. \quad (112.11)$$

Сила тока

$$I = \frac{dq}{dt} = -\omega C U_m \sin \omega t = I_m \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (112.12)$$

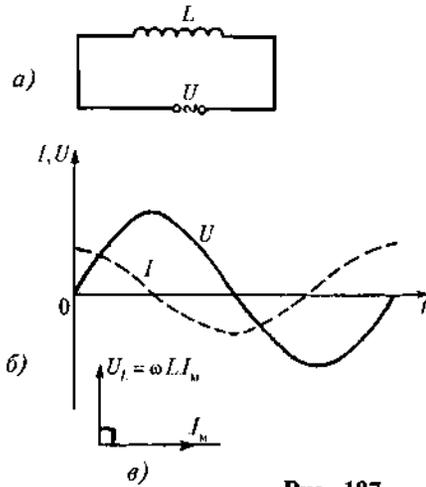


Рис. 187

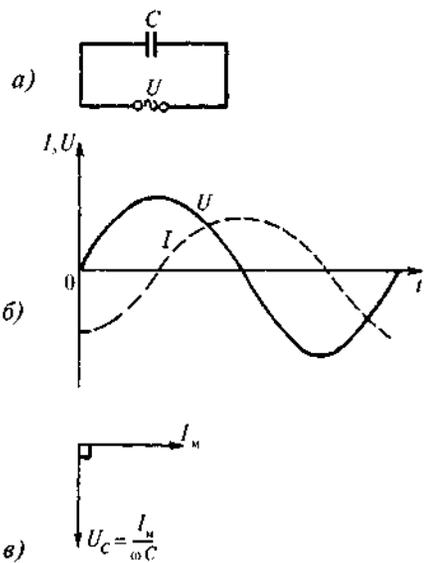


Рис. 188



**Вопросы для самопроверки**

1. Как определяется мгновенное значение силы тока, протекающего через активное сопротивление в цепи переменного тока? 2. Чему равна разность фаз амплитудных значений силы тока и напряжения в активном сопротивлении? 3. Чему равно амплитудное значение тока в цепи переменного тока с индуктивной катушкой?

где

$$I_m = \omega C U_m = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}}$$

Если это выражение сравнить с законом Ома, то поймем, что величина, стоящая в знаменателе, должна быть сопротивлением:

$$R_C = \frac{1}{\omega C} \quad (112.13)$$

Эту величину называют *реактивным емкостным сопротивлением* (или емкостным сопротивлением). Если выражение (112.13) будет постоянным током ( $\omega = 0$ ),  $R_C = \infty$  показывает, что постоянный ток не течет через конденсатор.

Таким образом, падение напряжения на конденсаторе будет:

$$U_C = U_m \cos \omega t = \frac{1}{\omega C} I_m \cos \omega t \quad (112.14)$$

Сравнивая (112.12) и (112.14) видим, что падение напряжения на конденсатора  $U_C$  отстает по фазе от силы тока  $I$  на  $\frac{\pi}{2}$  (рис. 188 б). Векторная диаграмма амплитудных значений напряжения и силы тока изображена на рисунке 188 в.

4. Чему равно реактивное индуктивное сопротивление? 5. Как меняется реактивное индуктивное сопротивление с увеличением частоты? 6. Соответствуют ли фазы падения напряжения на катушке силам тока? 7. Объясните векторную диаграмму амплитудных значений падения напряжения и силы тока. 8. Как определяется сила тока в цепи переменного тока с конденсатором? 9. Чему равно реактивное емкостное сопротивление? 10. Меняется ли реактивное емкостное сопротивление с увеличением частоты? 11. Как объяснить, что реактивное сопротивление будет бесконечно большим, если частота будет равна нулю? 12. Какая разница существует между падением напряжения на конденсаторе и силой тока?



**Содержание:**  $R, L, C$  в цепи переменного тока; напряжение и сила тока в цепи; разность фаз между напряжением и силой тока; полное реактивное сопротивление; резонанс напряжений.

**$R, L, C$  в цепи переменного тока.** Рассмотрим случай, когда в цепи переменного тока последовательно соединены активное сопротивление  $R$ , катушка индуктивности  $L$  и конденсатор емкостью  $C$  (рис. 189 а). Когда в цепь подают переменное напряжение, то на каждом элементе произойдет падение напряжения  $U_R, U_L$  и  $U_C$ . Векторная диаграмма их амплитуд изображена на рисунке 189 б.

Амплитуда приложенного к цепи напряжения  $U_m$  должна быть равна векторной сумме этих падений напряжения.

**Напряжение и сила тока в цепи.** Напряжение в цепи с помощью полученного треугольника определим следующим образом:

$$U_m^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2$$

Или

$$U_m = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} \quad (113.1)$$

Если теперь воспользуемся выражениями падений напряжений, то получим следующее:

$$U_m = \sqrt{(I_m R)^2 + \left[ \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) I_m \right]^2} \quad (113.2)$$

Также полное сопротивление в цепи переменного тока:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad (113.3)$$

Тогда закон Ома для цепи с переменным током будет

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} \quad (113.4)$$

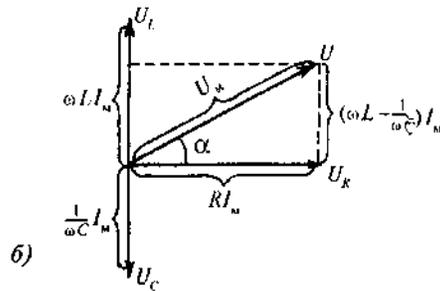
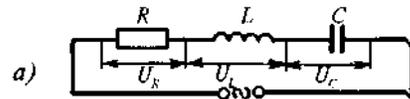


Рис. 189

**Разность фаз между напряжением и силой тока.** Из рисунка 189 б видно, что разность фаз между напряжением и силой тока равна  $\alpha$ . Определим ее:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (113.5)$$

Значит, если напряжение в цепи изменяется по закону

$$U = U_m \cos \omega t,$$

то по цепи течет ток

$$I = I_m \cos(\omega t - \alpha).$$

**Полное реактивное сопротивление.** Для цепи переменного тока выражение

$$X = R_L - R_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} \quad (113.6)$$

называют *полным реактивным сопротивлением*. (При протекании тока по реактивному сопротивлению тепло не выделяется.)

**Резонанс напряжений.** Теперь рассмотрим случай, когда реактивное сопротивление будет равно нулю:

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0. \quad (113.7)$$

Тогда в цепи возникает резонанс напряжений и закон Ома примет следующий вид:

$$I_m = \frac{U_m}{R}. \quad (113.8)$$

Здесь сила тока в цепи принимает наибольшее значение, фаза тока совпадает с фазой напряжения. Резонанс в цепи переменного тока с последовательно соединенным активным сопротивлением, катушкой индуктивности и конденсатором называют *резонансом напряжений*. Причиной этому является то, что напряжение на катушке индуктивности и конденсаторе намного больше входного напряжения.

Из выражения (113.7) находим  $\omega$ :

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (113.9)$$

Следовательно, когда частота принимает значение, удовлетворяющее этому условию, в цепи переменного тока происходит резонанс напряжений.  $\omega_{\text{рез}}$  называют *резонансной частотой*.



### Вопросы для самопроверки

1. Если в цепь включены  $R, L, C$ , то объясните векторную диаграмму падения напряжения на них.
2. Как связана амплитуда напряжения, приложенного к цепи, с падением напряжения?
3. Как определяется напряжение в цепи?
4. А полное сопротивление в цепи переменного тока?
5. Сформулируйте закон Ома для цепи переменного тока.
7. Что такое полное реактивное сопротивление?
8. Чем отличается реактивное сопротивление от активного сопротивления?
9. Чему будет равен ток в цепи, если реактивное сопротивление будет равно нулю?
10. При этих условиях чему будет равна разность фаз между силой тока и напряжением?
11. Какой резонанс называют резонансом напряжений?
12. Чему равна резонансная частота?



*Содержание:* мгновенное значение мощности переменного тока; средняя мощность переменного тока; коэффициент мощности; работа переменного тока;

**Мгновенное значение мощности переменного тока.** Мы знаем, что мощность постоянного тока определяется выражением

$$P = I \cdot U. \quad (114.1)$$

Мгновенную мощность переменного тока можно определить также через мгновенное значение напряжения и силы тока с помощью выражения, похожего на (114.1):

$$P(t) = U(t) \cdot I(t), \quad (114.2)$$

где  $U(t) = U_m \cos \omega t$ ,  $I(t) = I_m \cos(\omega t - \varphi)$  — значения напряжения и сила тока в цепи переменного тока (см. § 113). Значение  $U(t)$  и  $I(t)$  подставим в (114.2) и, раскрыв  $\cos(\omega t - \varphi)$ , получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} P(t) &= I_m U_m \cos(\omega t - \varphi) \cos \omega t = \\ &= I_m U_m (\cos^2 \omega t \cdot \cos \varphi + \sin \omega t \cdot \cos \omega t \cdot \sin \varphi). \end{aligned} \quad (114.3)$$

**Средняя мощность переменного тока.** Практический интерес представляет не мгновенное значение мощности, а ее среднее значение за период колебания.

Учитывая, что  $\langle \cos^2 \omega t \rangle = \frac{1}{2}$ ,  $\langle \sin \omega t \cdot \cos \omega t \rangle = 0$  из (114.3) получим:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi. \quad (114.4)$$

Учитывая, что  $U_m \cos \alpha = I_m R$  (см. рис. 189 б), для средней мощности будем иметь следующее выражение:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} R I_m^2. \quad (114.5)$$

Такую же мощность развивает постоянный ток  $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ .

Величины

$$I_{эф} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, U_{эф} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (114.6)$$

называют соответственно эффективными значениями тока и напряжения. Все амперметры и вольтметры градуируются в соответствии со значениями тока и напряжения.

**Коэффициент мощности.** Если использовать выражение (114.6), написанное для эффективных значений силы тока и напряжения, выражение средней мощности (114.4) можно записать в виде

$$\langle P \rangle = I_{эф} \cdot U_{эф} \cdot \cos \varphi, \quad (114.7)$$

где множитель  $\cos \varphi$  называют *коэффициентом мощности*.

Формула (114.7) показывает, что мощность, выделяемая в цепи переменного тока, в общем случае зависит не только от силы тока и напряжения, но и от сдвига фаз между ними. Если в цепи реактивного сопротивления отсутствует ( $X=0$ ), то  $\cos \varphi = 1$  и

$$P = I \cdot U \quad (114.8)$$

Если цепь содержит только реактивное сопротивление ( $R=0$ ), то  $\cos \varphi = 0$ , и независимо от того, какими бы большими ни были сила тока и напряжение, средняя мощность будет равна нулю. Если  $\cos \varphi$  имеет значение существенно меньше единицы, тогда чтобы при данном напряжении генератора передавать заданную мощность, нужно увеличивать силу тока. Это приведет либо к выделению в сети дополнительного количества тепла, либо из-за увеличения поперечного сечения проводника к повышению стоимости линий электропередач. Поэтому на практике всегда стремятся увеличить  $\cos \varphi$ , наименьшее допустимое значение которого для промышленных установок составляет примерно 0,85.

**Работа переменного тока.** Найдем среднюю работу переменного тока за время  $T$ . Эта работа определяется произведением средней мощности на период:

$$A = \langle P \rangle \cdot T. \quad (114.9)$$

Если воспользуемся выражениями (114.4) и (114.5), найденные для средней мощности, то получим:

$$\langle A \rangle = \frac{1}{2} I_m \cdot U_m \cdot T \cos \varphi; \quad (114.10)$$

$$\langle A \rangle = \frac{1}{2} R T I_m^2. \quad (114.11)$$



### Вопросы для самопроверки

1. Чему равна мощность переменного тока? 2. Чему равна мгновенная мощность переменного тока? 3. А средняя мощность переменного тока? 4. Чему равно эффективное значения силы тока и напряжения? 5. Каковы выражения для эффективных значений мощности переменного тока, силы тока и напряжения? 6. Что называют коэффициентом мощности? 7. Чему будет равна мощность, если в цепи отсутствует реактивное сопротивление? 8. Чему будет равна средняя мощность, если в цепи отсутствует активное сопротивление? 9. Почему значение коэффициента мощности не должно быть намного меньше единицы? 10. Чему равно самое приемлемое значение коэффициента мощности? 11. Чему равна средняя работа переменного тока за время  $T$ ?



### § 115. Понятие о трехфазном токе

**Содержание:** необходимость многофазных токов; трехфазный ток.

**Необходимость многофазных токов.** До 90-х годов XIX столетия использовался только однофазный ток (от генератора до потребителя тянули два провода), который в основном использовался для освещения. Но изготовление мощных двигателей, работающих на однофазном токе, потерпело неудачу. Поэтому появилась идея использовать многофазный ток.

В 1889—1891 годах русский электротехник М. Доливо-Добровольский предложил схему трехфазного тока. Это предложение вскоре начало широко применяться. Все электротехнические устройства начали работать на трехфазном токе.

Трехфазной системой электрической цепи называют систему, в которой фазы ЭДС сдвинуты относительно друг друга на  $\frac{1}{3}$  периода, и состоящую из трех электрических цепей переменного тока одинаковой частоты. Если фазы ЭДС взаимно равны, то такую систему называют симметричной. Каждая цепь трехфазной системы коротко называется фазой. Схемы самого простого трехфазного генератора приведены на рисунке 190 а. Генератор состоит из трех обмоток, сдвинутых относительно друг друга на угол  $\frac{2}{3}\pi$ . Когда ротор вращается с постоянной скоростью, на катушке индуцируется переменная ЭДС с одинаковыми частотой и амплитудой, но сдвинутые фазы отличаются друг от друга на  $\frac{1}{3}$  периода. ЭДС в обмотках определяется следующими выражениями:

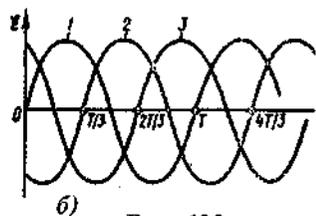
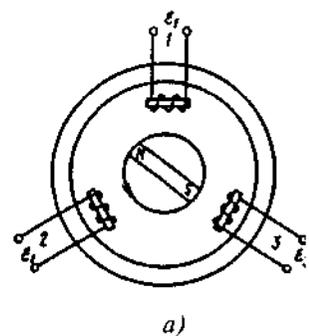


Рис. 190

в 1-й обмотке:  $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$ ;

во 2-й обмотке:  $\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_0 \sin \left( \omega t - \frac{2}{3} \pi \right)$ ;

в 3-й обмотке:  $\mathcal{E}_3 = \mathcal{E}_0 \sin \left( \omega t - \frac{4}{3} \pi \right)$ .

Изменение ЭДС в обмотках в виде графика приведено на рисунке 190 б.

У трехфазного генератора каждая обмотка является самостоятельным источником электрической энергии. Значит, такой генератор равносителен трехфазным генераторам. Если предположим, что эти генераторы никак не связаны друг с другом, тогда чтобы передать электрическую энергию потребителю, из трехфазного генератора необходимо протянуть шесть проводов.

Такая система очень неудобна. Поэтому чтобы сократить число передающих проводов, обмотки генератора соединяются по типу звезды или треугольника.



### Вопросы для самопроверки

1. Каким током пользовались до девяностых годов XIX в.? 2. Какая была необходимость для многофазного тока? 3. Кто предложил трехфазную систему тока? 4. Что называют трехфазной системой тока? 5. Что называют симметричной системой? 6. В чем суть принципа работы генератора трехфазного тока? 7. Каково устройство трехфазного генератора тока? 8. Отличаются ли друг от друга периоды переменной ЭДС? 9. Каков знак ЭДС в обмотках? 10. Назовите способы соединения обмоток генератора переменного тока.



**Содержание:** состояние производства электрической энергии в Узбекистане; перспективы электрификации.

**Состояние производства электрической энергии в Узбекистане.** Использование электрической энергии в Узбекистане началось с начала XX в., когда были построены две электростанции. Одна из них обеспечивала электрическим током трамвай в г. Ташкенте, другая использовалась для освещения. Затем началось строитель-

ство гидроэлектростанций. В 50-х годах XX в. в Узбекистане были открыты крупные месторождения природного газа, что создало условия для быстрого развития выработки электроэнергии. В 60—70-х годах введение в строй тепловых электростанций, работающих на природном газе, таких как Ташкентская, Навоийская, Тахиаташская, Сырдарьинская и работающая на основе угольного месторождения Ангренская тепловая электростанция, повысили долю тепловых электростанций в общей выработке электроэнергии до 80%. В настоящее время электрическая система Узбекистана располагает 37 тепловыми и гидроэлектростанциями, которые могут выработать в год свыше 55 млрд кВт·ч электроэнергии. Общая протяженность линий электропередачи всех напряжений составляет около 228 тыс. км. Из них 5,5 тыс. км — это 220 кВ, 1,7 тыс. км — 500 кВ-высоковольтные линии.

**Перспективы электрификации.** В Узбекистане двадцать семь гидроэлектрических станций. В 1995 году на них было выработано 6331,2 млн кВт·ч электрической энергии. В перспективе планируется построение гидроэлектростанций на реке Пскем, на Топалангском, Хисоракском, Ахангаранском водохранилищах. (Список крупных гидроэлектростанций приводится в таблице 11.)

В результате построения тепловых электростанций в 1995 году установочная мощность энергетической системы дошла до 11,3 млн кВт. В ближайшее время планируется введение в строй Новоангренской и Талимарджанской тепловых электростанций. (Список крупных тепловых электростанций приводится в таблице 12 и список тепловых электроцентралей в таблице 13.)

Таблица 11

### Самые крупные гидроэлектростанции Узбекистана

Название	Установленная мощность мВт	Число турбин	Год постройки	Источник воды
Чарвакская ГЭС	620,5	4	1970—1972	Чирчик
Ходжакентская ГЭС	165	3	1976	Чирчик
Газалкентская ГЭС	120	3	1980—1981	Чирчик
Фархадская ГЭС	126	4	1948—1949	Сырдарья

Таблица 12

Список самых крупных тепловых электростанций  
Узбекистана

Название	Установленная мощность МВт	Число агрегатов	Год постройки	Местоположение	Примечание
Сырдарьинская ТЭС	3000	10	1972—1981	Ширин	Проектная мощность 240 кВт
Ново-ангренская ТЭС	1800	6	начато в 1985 году	Нурабад	Проектная мощность 320 мВт
Ташкентская ТЭС	1860	12	1963—1971	Ташкент	
Навоийская ТЭС	1250	11	1963—1981	Навои	
Ангренская ТЭС	484	8	1957—1963	Ангрэн	
Тахиаташская ТЭС	730	5	1961—1990	Тахиаташ	
Талимарджанская ТЭС	—	—	начато в 1984 году	Нуристан	

Таблица 13

## Крупные тепловые электроцентралы

Название	Установленная мощность МВт	Год постройки	Местоположение	Примечание
Ферганская ТЭЦ	330	1956—1979	Киргули	Проектная мощность 140 мВт
Муборакская ТЭЦ	60	1985—1988	Муборак	
Ташкентская ТЭЦ	30	1939—1954	Ташкент	

Примечание. Цифры взяты по состоянию на 1995 год.



## Вопросы для самопроверки

1. Когда началась электрификация в Узбекистане? 2. Почему в Узбекистане большое внимание уделяется строительству тепловых электростанций? 3. Какие тепловые электростанции вы знаете? 4. Какова доля тепловых электростанций в общей выработке электрической энергии? 5. Какова в настоящее время годовая мощность выработки электрической энергии энергосистемой Узбекистана? 6. Сколько электростанций имеется в Узбекистане? 7. Какова общая протяженность линий электропередач в Узбекистане? 8. Сколько имеется высоковольтных линий? 9. Сколько гидроэлектростанций имеется в Узбекистане? 10. Приведите название и характеристики крупнейших электростанций. 11. Какие гидроэлектростанции планируются построить? 12. Приведите название и характеристики крупнейших тепловых электростанций. 13. Приведите название и характеристики крупнейших тепловых электроцентралей. 14. Каковы перспективы тепловых электрических станций?



## Образцы решения задач

**Задача 1.** Обмотка катушки состоит из 500 витков медной проволоки площадью поперечного сечения  $1 \text{ мм}^2$ . Длина катушки 50 см, диаметр 5 см. Какой частоты переменный ток надо подключить к катушке, чтобы полное сопротивление катушки было в два раза больше его активного сопротивления?

**Дано:**

$$\begin{aligned} S &= 1 \text{ мм}^2 = 10^{-6} \text{ м}^2; \\ N &= 500; \\ l &= 50 \text{ см} = 0,5 \text{ м}; \\ d &= 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\ Z/R &= 2; \\ \gamma &= 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ В} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

$$\nu = ?$$

**Решение.** Так как в цепи нет конденсатора, то  $R_c = 0$  и полное сопротивление катушки определяется следующим образом:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}.$$

Из этого выражения найдем:

$$\omega = \frac{R}{L} \sqrt{\left(\frac{Z}{R}\right)^2 - 1} = \sqrt{3} \frac{R}{L}.$$

Если учтем, что  $Z/R = 2$ ,  $\omega = 2\pi\nu$ , то получим  $\nu = \frac{\sqrt{3} R}{2\pi L}$ .

где  $R$  — активное сопротивление:  $R = \rho \frac{l}{S} = \frac{\pi \cdot d \cdot N}{S}$ .

Здесь учитывали, что длина провода равна  $l = \pi d \cdot N$ . Индуктивность  $L$  равна

$$L = \mu_0 \left( \frac{N}{l} \right)^2 V = \mu_0 \left( \frac{N}{l} \right)^2 \cdot l \cdot \pi \frac{d^2}{4} = \pi \mu_0 \frac{d^2 N^2}{4l}$$

Используя найденные выражения для  $R$  и  $L$ , находим  $v$ :

$$v = \frac{2\sqrt{3}\rho l}{\pi \mu_0 d \cdot S \cdot N}$$

Используя численные значения величин, находим ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м):

$$v = \frac{2\sqrt{3} \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 0,5}{4\pi^2 \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-6} \cdot 500} \text{ Гц} \approx 240 \text{ Гц}$$

Ответ:  $v = 240$  Гц.

**Задача 2.** Индуктивность колебательного контура  $0,5$  мГн. Какой должна быть емкость контура, чтобы был резонанс на длине волны  $300$  м.

**Дано:**

$$L = 0,5 \text{ мГн} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}; \\ l = 300 \text{ м}$$

**Решение.** В колебательном контуре период колебания определяется формулой Томсона:

$$C_0 = ?$$

$$T = 2\pi\sqrt{LC_0}$$

С другой стороны, период колебания, при котором происходит резонанс, и длина волны связаны следующим образом:

$$\lambda = CT,$$

отсюда

$$T = \frac{\lambda}{c},$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость света в вакууме. Приравняв выражения, найденные для периода, найдем емкость  $C_0$ :

$$\frac{\lambda}{c} = 2\pi\sqrt{LC_0} \text{ или } C_0 = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 c^2 L}$$

Используя численные значения величин, находим:

$$C_0 = \frac{(300)^2}{4 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \cdot (3 \cdot 10^{-4})} \text{ Ф} = 0,051 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} = 51 \text{ пФ}$$

Ответ:  $C_0 = 51$  пФ.



### Задачи для самостоятельного решения

1. В цепь переменного тока напряжением  $220$  В и частотой  $50$  Гц включены последовательно конденсатор емкостью  $35,4$  мкФ, активное сопротивление  $100$  Ом и катушка индуктивности  $0,7$  Гн. Найти силу тока в цепи и падение напряжения на конденсаторе, индуктивности и активном сопротивлении.

$$(I_m = 1,34 \text{ А}; U_C = 121 \text{ В}, U_R = 134 \text{ В}, U_L = 295 \text{ В})$$

2. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью  $8$  пФ и катушки индуктивностью  $0,5$  мГн. Найти максимальное напряжение на обкладках конденсатора, если максимальное значение силы тока равно  $40$  мА. ( $U_{\text{max}} = 316$  В)

3. Колебательный контур состоит из параллельно соединенных катушки индуктивности и конденсатора. Длина катушки  $50$  см, площадь поперечного сечения  $3$  см<sup>2</sup> и имеет  $1000$  витков. Площадь обкладок конденсатора  $75$  см<sup>2</sup>, расстояние между ними  $5$  мм и заполнена воздухом. Найти период колебания контура. ( $T = 0,6$  мс)

4. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью  $0,5$  нФ и катушки индуктивности  $0,4$  мГн. Определить длину волны, возбуждающуюся в контуре. ( $l = 843$  м)

### Тестовые вопросы

1. Из приведенных выражений покажите уравнение электромагнитного колебания и формулу Томсона.

A.  $q = q_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ ;  $T = 2\pi\sqrt{LC}$ .

B.  $U = \frac{q}{C}$ ;  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ .

C.  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ;  $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$ .

D.  $I = \frac{dq}{dt}$ ;  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ .

E. Правильного ответа нет.

2. Сила тока в колебательном контуре изменяется по закону  $I = 0,01 \cos 1000 t$ . Найдите индуктивность, если емкость конденсатора в колебательном контуре равна  $2 \cdot 10^{-5}$  Ф.

- A.  $0,01$  Гн.      B.  $0,02$  Гн.      C.  $0,03$  Гн.  
D.  $0,04$  Гн.      E.  $0,05$  Гн.

3. Из приведенных формул найдите выражение для индуктивного сопротивления.

A.  $R_L = L\omega$ .

B.  $R = \rho \frac{l}{S}$ .

C.  $x = \frac{1}{C\omega}$ .

$$D. R = \frac{U}{I} \quad E. I_m = \frac{U_m}{\omega L}$$

4. Как меняется период колебания контура, если увеличить индуктивность и емкость колебательного контура в четыре раза?

- А. Увеличится в 4 раза.      В. Уменьшается в 4 раза.  
 С. Увеличится в 16 раз.      D. Уменьшается в 16 раз.  
 E. Останется без изменения.

### Основные выводы

*Электромагнитными колебаниями* называют взаимосвязанное, периодическое изменение зарядов, токов, напряженности электрического и магнитного полей.

Уравнение электромагнитных колебаний имеет вид

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0.$$

*Циклическая частота колебаний:*  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , период же определяется  $T = 2\pi\sqrt{LC}$ .

*Переменным током* называют ток, изменяющий со временем силу и направление.

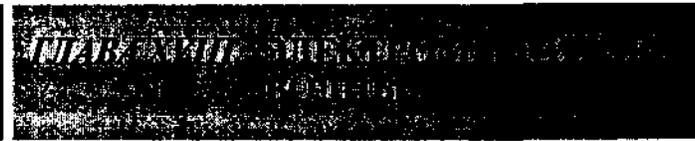
Число полных колебаний за одну секунду называют *частотой переменного тока*. Частота тока, используемая в народном хозяйстве  $\nu = 50$  Гц.

*Генератором переменного тока* называют, устройство превращающее различные виды энергии в электрическую энергию.

*Электродвигателем* называют устройство, превращающее электрическую энергию в механическую энергию.

$$\text{Мощность переменного тока: } \langle P \rangle = \frac{1}{2} RI_m^2.$$

$$\text{Работа переменного тока: } \langle A \rangle = \frac{1}{2} RT_m^2.$$



Глубоко проанализировавший электромагнитную индукцию английский физик Дж. Максвелл пришел к выводу, что электрическое и магнитное поле взаимосвязаны. Изменение одного из них приводит к появлению другого.

Электромагнитное поле является особым видом материи, существующим вне нашего сознания.

Электромагнитные волны — это распространение электромагнитного поля в пространстве.



**Содержание:** вихревое электрическое поле: ток смещения.

**Вихревое электрическое поле.** Было показано, что в неподвижном проводнике, находящимся в переменном магнитном поле, возбуждается ЭДС индукции. Но чтобы появился электрический ток, должна существовать сторонняя сила, приводящая в движение носителей заряда. Тогда возникает вопрос, какие силы в данном случае приводят в движение электроны.

Естественно, что эта сила не связана ни с тепловыми, ни с химическими процессами. Она не является и силой Лоренца, так как сила Лоренца не действует на неподвижный заряд. Максвелл выдвинул гипотезу, согласно которой любое изменение магнитного поля приводит к появлению электрического поля, которое в свою очередь, приводит в движение электроны внутри проводника и становится причиной появления в цепи ЭДС индукции. Значит, в отличие от электрического поля, создающегося электрическими зарядами, силовые линии электрического поля, возникающие в результате изменения магнитного поля, имеют характер замкнутых линий, т.е. является вихревым полем.

Максвелл, анализируя явление электромагнитной индукции, пришел к выводу, что причина появления ЭДС индукции в появлении вихревого электрического поля, проводник же играет второстепенную роль и служит в качестве прибора, регистрирующего это поле.

Поэтому особая важность явления электромагнитной индукции заключается не в появлении электрического тока, а в подтверждении появления вихревого электрического поля. Значит,

любое изменение магнитного поля приводит к появлению вихревого электрического поля.

**Ток смещения.** Возникает вопрос, если каждое изменение магнитного поля порождает вихревое электрическое поле, тогда обратный процесс, т.е. изменение электрического поля, не порождает ли вихревое магнитное поле?

Максвелл на этот вопрос отвечает так: любое изменение электрического поля должно порождать вокруг вихревое магнитное поле. Чтобы установить количественную связь между изменяющимся электрическим полем и возникающим магнитным полем, Максвелл ввел понятие тока смещения. По его мысли, как только возникает магнитное поле, должен появиться ток, возбуждающий это поле. Следует отметить, что ток смещения обладает только одним свойством электрического тока — свойством создавать магнитное поле. Он не обладает никакими другими свойствами тока.



### Вопросы для самопроверки

1. Что называют электромагнитными волнами? 2. Возникает ли ЭДС индукции в неподвижном проводнике, находящемся в переменном магнитном поле? 3. Какая сила приводит в движение заряды внутри неподвижного проводника? 4. Почему эта сила не может быть силой Лоренца? 5. Из чего состоит гипотеза Максвелла? 6. Какой характер имеет электрическое поле, порожденное магнитным полем? 7. Каково заключение Максвелла об электромагнитной индукции? 8. В чем заключается значение явления электромагнитной индукции? 9. Когда возникает вихревое электрическое поле? 10. Что возникает при изменении электрического поля? 11. С какой целью введено понятие тока смещения? 12. Чем отличается ток смещения от обычного электрического тока?



### 19. Теория Максвелла об электромагнитном поле

**Содержание:** электромагнитное поле; теория Максвелла; выводы теории Максвелла; энергия электромагнитного поля.

**Электромагнитное поле.** Таким образом, мы удостоверились, что электрические и магнитные явления взаимосвязаны, теперь постараемся систематизировать вытекающие из этого выводы. Эти выводы составляют основу теории Максвелла.

**1. Вихревой характер электрического поля.** Электрическое поле является суммой полей двух типов: **первый** — потенциальное поле ( $\vec{E}_Q$ ), которое создается электрическими зарядами. Поэтому

силовые линии электрического поля начинаются от положительного заряда и кончаются на отрицательном заряде. Существует поток силовых линий, не имеющий вихревого характера.

**Второй тип поля** не является потенциальным ( $\vec{E}_B$ ). Такое поле возникает за счет изменения магнитного поля: так как отсутствует начало и конец силовых линий, то нет потока. Поле имеет вихревой характер. Напряженность электрического поля равна векторной сумме этих напряженностей:

$$\vec{E} = \vec{E}_Q + \vec{E}_B.$$

Таким образом, электрическое поле создают не только электрические заряды, но и переменное магнитное поле.

**2. Возникновение магнитного поля.** Силовые линии магнитного поля не имеют ни начала, ни конца, они имеют характер вихревого поля.

**Магнитное поле создается электрическим током (движением заряженных частиц) или переменным электрическим полем.**

**3. Поток силовых линий электрического поля.** В природе существуют электрические заряды. Силовые линии электрического поля начинаются на заряде и на заряде кончаются, поэтому можно подсчитать поток силовых линий электрического поля.

**4. Поток силовых линий магнитного поля.** В природе не существует магнитных зарядов, поэтому не существует потока силовых линий магнитного поля, он равен нулю.

Максвелл написал систему уравнений, обобщающую эти четыре вывода. Они называются уравнениями Максвелла для электромагнитного поля.

**Выводы теории Максвелла.** Теория Максвелла утверждает, что переменное магнитное поле, возбуждающее электрическое поле, и переменное электрическое поле, возбуждающее магнитное поле, взаимосвязаны друг с другом. Электрическая и магнитная волны взаимосвязаны и образуют единую электромагнитную волну (рис. 191).

Теория Максвелла показала, что электромагнитное поле распространяется в пространстве с конечной скоростью, т.е. ученый

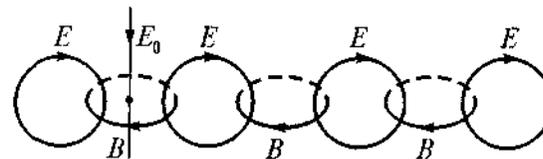


Рис. 191



Дж. Максвелл  
(1831—1879)

предсказал существование электромагнитной волны. В дальнейшем эксперименты показали, что скорость этой волны в пространстве равна  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с, и свет состоит из электромагнитной волны. Немецкий физик Г. Герц экспериментально доказал существование электромагнитных волн и показал, что их появление и распространение полностью соответствуют теории Максвелла.

**Энергия электромагнитного поля.** Электромагнитная волна — это одна из разновидностей материи. Ее энергия равна сумме энергий электрического и магнитного полей:

$$W = W_e + W_m.$$

Также и плотность энергии электромагнитного поля равна сумме плотностей энергий электрического и магнитного полей:

$$\omega = \omega_e + \omega_m$$

или

$$\omega = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2},$$

где  $H = \frac{B}{\mu \mu_0}$



#### Вопросы для самопроверки

1. Зависят ли друг от друга электромагнитные явления? 2. Из суммы каких полей состоит электрическое поле? 3. Как возникает электрическое поле первого типа и каково его объяснение? 4. Как возникает электрическое поле второго типа и каково его объяснение? 5. Чему равно общее напряжение электрического поля? 6. Как образуется магнитное поле? 7. Существует ли поток силовых линий электрического поля? 8. А поток силовых линий магнитного поля? 9. Каковы четыре вывода Максвелла? 10. В чем заключается теория Максвелла для электромагнитного поля? 11. Как образуется электромагнитное поле? 12. Чему равна скорость распространения электромагнитных волн в пространстве? 13. А световых электромагнитных волн? 14. Что доказал Герц своим опытом? 15. Материально ли электромагнитное поле? 16. Из чего состоит энергия электромагнитного поля? 17. Чему равна энергия электромагнитного поля? 18. Чему равна плотность энергии электромагнитного поля?

### §119. Электромагнитные волны и их свойства

Содержание: электромагнитные волны; скорость распространения волны; длина волны; свойство электромагнитной волны; шкала электромагнитных волн.

**Электромагнитные волны.** Индукция  $B$  магнитного поля, возникающая при изменении электромагнитного поля, пропорциональна скорости изменения напряженности электрического поля:

$$B \approx \frac{dE}{dt}.$$

А напряженность электрического поля, возникающая при изменении магнитного поля, согласно закону Фарадея, пропорциональна скорости изменения индукции магнитного поля:

$$E \approx \frac{dB}{dt}.$$

Если где-то в пространстве возникает вихревое электрическое поле, силовые линии, появляющиеся в результате этого переменного магнитного поля, окружают силовые линии электрического поля концентрическими окружностями. Так же появляющиеся в результате изменения магнитного поля силовые линии вихревого электрического поля окружают силовые линии магнитного поля и далее будет продолжаться таким же образом.

Значит, переменные электрические и магнитные поля взаимосвязаны и распространяются в пространстве в виде электромагнитных волн.

Распространение в пространстве переменного электромагнитного поля называют *электромагнитной волной*.

Следствием теории Максвелла является поперечность электромагнитных волн, т. е. векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной вектору скорости распространения волны (рис. 192). Кроме этого, векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  электромагнитной волны всегда колеблются в одинаковых фазах, одновременно достигают максимума и одновременно обращаются в нуль.

**Скорость распространения волны.** Согласно теории Максвелла скорость распространения электромагнитных волн — величина конечная. Она определяется электрическими и магнитными свойствами среды, где распространяется электромагнитная волна:



Рис. 192

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon \mu}}, \quad (119.1)$$

где  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  соответственно электрическая и магнитная постоянные;  $\epsilon$  и  $\mu$  соответственно диэлектрическая и магнитная проницаемости среды.

Если электромагнитная волна распространяется в вакууме, то  $\epsilon = 1, \mu = 1$ . И скорость распространения электромагнитной волны в вакууме:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Значит, скорость распространения электромагнитной волны в вакууме равна скорости распространения света в вакууме:

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

**Длина волны.** Длиной волны называют расстояние, пройденное электромагнитной волной за время, равное периоду колебания.

Если  $v$  — скорость распространения электромагнитной волны в однородной среде,  $T$  — период волны;  $\nu$  — частота,  $\lambda$  — длина волны, тогда  $\lambda = vT$  или  $\lambda = v/\nu$ . Для вакуума же  $\lambda_0 = cT$  или

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu}. \quad (119.2)$$

Так как скорость распространения волны зависит от величин  $\epsilon$  и  $\mu$ , характеризующих среду, то при переходе из одной среды в другую  $v$  и  $\lambda$  изменяются, частота же волны остается постоянной.

Если волна из вакуума переходит в среду с диэлектрической  $\epsilon$  и магнитной  $\mu$  проницаемостью, то длина волны уменьшается:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon \mu}},$$

где  $\lambda_0$  — длина волны в вакууме.

**Свойство электромагнитных волн.** Мы отмечали, что электромагнитные волны — это поперечные волны. Они в вакууме распространяются со скоростью, равной скорости света в вакууме  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Скорость электромагнитной волны и длина волны зависят от свойств среды. Частота электромагнитной волны для всех сред одна и та же величина. Так же как световые волны отражаются от препятствия, на границе двух сред преломляются, вступая в интерференцию.

Другими словами, все свойства электромагнитных волн похожи на свойства света. Значит, отсюда вытекает такое заключение: световой луч состоит из электромагнитных волн. Последующие

эксперименты показали, что не только световые лучи, но и инфракрасные, ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма-лучи тоже имеют электромагнитную природу.

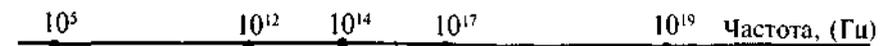
**Шкала электромагнитных волн.** Значит, электромагнитные волны существуют в очень широком диапазоне и отличаются друг от друга способом их генерации и регистрации, частотами и некоторыми другими свойствами. Границы между различными видами электромагнитных волн довольно условные, в вакууме они распространяются с одинаковой скоростью.

Таблица 14

Некоторые типы электромагнитных волн

Вид излучения	Длина волны, м	Частота волны, Гц	Источник излучения
Радиоволны	$10^3 - 10^{-4}$	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^{12}$	колебательный контур, вибратор Герца, массовый излучатель, ламповый генератор
Световые волны			
Инфракрасное излучение	$5 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{11} - 3,75 \cdot 10^{14}$	лампы, лазеры
Видимый свет	$8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$	$3,75 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$	
Ультрафиолетовое излучение	$4 \cdot 10^{-7} - 10^{-9}$	$7,5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$	
Рентгеновские лучи	$2 \cdot 10^{-9} - 6 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{19}$	рентгеновская трубка
$\gamma$ -излучение	$< 6 \cdot 10^{-12}$	$> 5 \cdot 10^{19}$	радиоактивный распад; ядерные процессы, космические процессы

Шкала электромагнитных волн



Радиоволны, оптический диапазон, рентгеновские лучи,  $\gamma$ -лучи.



## Вопросы для самопроверки

1. Зависит ли индукция магнитного поля от изменения напряженности электрического поля? 2. А напряженность электрического поля? 3. Как возникают электромагнитные волны? 4. Какие волны называют электромагнитными? 5. Как расположены векторы  $E$  и  $B$  в электромагнитной волне? 6. Совпадают ли фазы  $E$  и  $B$  векторов в электромагнитной волне? 7. Как определяется скорость электромагнитной волны на основании теории Максвелла? 8. Чему равна скорость распространения электромагнитной волны в вакууме? 9. Что называют длиной волны? 10. Как определяется длина волны? 11. Зависит ли скорость распространения волны от среды? длина волны? 12. Как связаны длины волн в вакууме и в среде? 13. Зависит ли частота волны от среды? 14. Какие свойства электромагнитной волны вы знаете? 15. Какие свойства электромагнитной волны похожи на свойства световой волны? 16. Является ли свет электромагнитной волной? 17. Какие еще лучи имеют электромагнитную природу? 18. Какие особенности имеют электромагнитные волны? 19. У всех ли волн скорость распространения одинаковая?

## § 120. Вибратор Герца. Открытый колебательный контур



Генрих Герц  
(1857 — 1894)

Содержание: колебательный контур, открытый колебательный контур.

**Колебательный контур.** В общем, любой электрический колебательный контур или проводник, по которому течет переменный ток, может быть источником электромагнитных волн, поскольку для возбуждения электромагнитных волн достаточно создать в пространстве электромагнитное поле. Но чтобы излучение играло заметную роль, необходимо увеличить объем пространства, в котором переменное электромагнитное поле создается. Поэтому закрытые колебательные контуры, приведенные на рисунке 185, не пригодны для получения электромагнитных волн, так как в них электрическое поле сосредоточено между обкладками конденсатора, а магнитное — внутри катушки индуктивности.

**Открытый колебательный контур.** Значит, чтобы создать условия для распространения электромагнитного поля, надо увеличить область пространства, где возникает поле. Как можно достичь этого? Единственный путь — это увеличить расстояние между

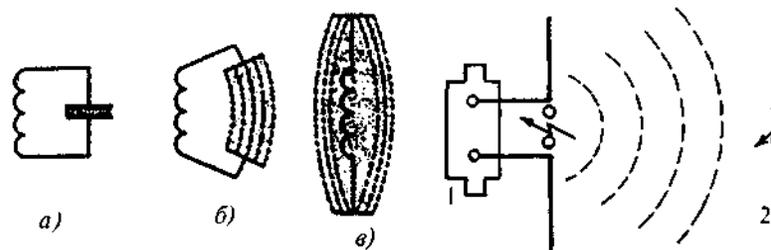


Рис. 193.

Рис. 194

обкладками конденсатора. Немецкий физик Г. Герц поступил именно так. Он уменьшил число витков в катушке и площадь пластин конденсатора и раздвигая их (рис. 193 *a, б*), совершил переход к системе, состоящей из двух стержней, разделенных промежутком. В результате совершил переход от закрытого колебательного контура к открытому колебательному контуру (вибратору Герца) (рис. 193 *д*). В открытом колебательном контуре электромагнитное поле заполняет окружающее контур пространство, что существенно повышает интенсивность электромагнитного излучения. Колебания в такой системе поддерживаются за счет источника ЭДС, подключенного к обкладкам конденсатора. Искровой промежуток применяется для того, чтобы увеличить разность потенциалов, до которой первоначально заряжаются обкладки.

Так как  $\nu = \frac{1}{T}$  и  $T = 2\pi\sqrt{L \cdot C}$ , с уменьшением  $L$  и  $C$  увеличивается частота колебания. В этом вибраторе переменное магнитное поле сосредоточивается не внутри конденсатора, а окружает вибратор со всех сторон. В результате резко возрастает интенсивность излучения. Электромагнитные волны, распространяемые открытым вибратором 1, Герц регистрировал при помощи вибратора 2 (резонатора), настроенного на эту длину волны (рис. 194).

Когда электромагнитные волны достигали вибратора 2, на нем возникали электромагнитные колебания и в разрядном промежутке проскакивала электрическая искра. Регистрация электромагнитных волн и появление искры показывает, что волны переносят энергию. Используя вибратор и резонатор, Герц показал, что электромагнитные волны обладают такими же свойствами, как и другие волны.

С помощью вибратора Герцем были получены плоские волны длиной от 0,6 до 10 м и было показано, что электромагнитные волны являются поперечными. Герц получил стоячие электромагнитные волны, с их помощью определил скорость электромагнитных волн и показал, что она совпадает со скоростью света.



## Вопросы для самопроверки

1. Какими бывают источники электромагнитных волн? 2. Что необходимо для распространения электромагнитной волны? 3. Почему закрытый колебательный контур считается бесполезным для образования электромагнитной волны? 4. Какое условие должно выполняться, чтобы электромагнитная волна распространилась в пространстве? 5. Что нужно сделать, чтобы создать открытый колебательный контур, или вибратор Герца? 6. Где в открытом колебательном контуре сосредоточена электромагнитная волна? 7. В чем суть принципа работы открытого колебательного контура? 8. Каким образом принимаются электромагнитные волны? 9. Переносят ли энергию электромагнитные волны? Как это можно узнать? 10. Какие волны возбуждаются в вибраторе Герца? 11. Что определил Герц в своих опытах? 12. Равна ли скорость распространения электромагнитной волны скорости света?

## § 121. Изобретение радио. Понятие о радиосвязи

Содержание: первый радиоприемник; дальнейшие исследования; понятие о радиосвязи; радиотелефонная связь.



А.С. Попов  
(1859 — 1906)

**Первый радиоприемник.** Впервые идею передачи сигнала с использованием электромагнитных волн высказал А.С. Попов (1859—1906) в 1889 году. Он в 1895 г. создал первый радиоприемник и продемонстрировал его. В качестве детали, непосредственно чувствующей электромагнитные волны, А.С. Попов применил когерер (лат. *kogirinsio* — *сцеплять*). Когерер использовался для управления источником, обеспечивающим энергией регистрирующий аппарат — электрический звонок. Схема первого радиоприемника приведена на рисунке 195. Через приемную антенну *M* принятый электромагнитный сигнал поступает на когерер *AB*. Этот прибор представляет собой стеклянную трубку с двумя электродами. В трубку помещены мелкие металлические опилки. Действие прибора основано на влиянии электрических разрядов на металлические порошки. В обычных условиях когерер обладает большим сопротивлением и через него не течет ток, так как опилки имеют плохой контакт друг с другом. Пришедшая электромагнитная волна создает в когерере переменный ток высокой частоты. Между опилками проскакивает искра, которая сваривает опилки, в результате сопротивление когерера резко падает и идет электрический ток.

В опытах Попова сопротивление уменьшалось с 100 000 Ом до 1000—500 Ом (т.е. в 100—200 раз). Снова вернуть прибору большое сопротивление можно, встряхнув его. Значит, электромагнитные волны изменяют сопротивление когерера, и он пропускает ток.

В результате через обмотку реле, удерживающей якорь, идет ток, контакт *C* замыкается. Якорь замыкает контакт реле, и ток течет по обмотке звонка. Звонок притягивает свой якорь, молоточек ударяет, и звонок звенит. В этот самый момент контакт звонка *D* размыкает сеть и ток прекращается. Молоточек звонка ударяет по когереру, при этом повышается его сопротивление и он возвращается в первоначальное состояние. Аппарат был готов к приему новой электромагнитной волны. 7 мая 1895 года А. Попов продемонстрировал действие своего прибора и этот день стал днем рождения радио.

**Дальнейшие исследования.** Чтобы повысить чувствительность радиоприемника, А.С. Попов один из выводов когерера заземлил, а другой присоединил к высоко поднятому куску проволоки. Таким образом он создал первую в мире приемную антенну. Заземление превращает проводящую поверхность земли в часть открытого колебательного контура, что увеличивает дальность приема.

Вначале радиосвязь была установлена на расстоянии всего 250 м. Неустанно работая над своим изобретением, Попов вскоре добился дальности связи более 600 м. В 1899 году была установлена радиосвязь на расстоянии до 20 км. В 1901 году дальность радиосвязи была уже 150 км.

Принцип работы современных радиоприемников не отличается от приемника Попова. Современные радиоприемники тоже принимают антенной слабые электромагнитные колебания. Эти сигналы управляют источниками энергии, обеспечивающими цепи энергией. В настоящее время такое управление осуществляется электронными лампами и транзисторами.

**Понятие о радиосвязи.** Принцип радиосвязи заключается в следующем. Вокруг высокочастотного переменного тока, возбуждаемого на передающей антенне, возникает переменное электромагнитное поле. Это поле распространяется в виде электромагнитной волны. Когда волна достигает приемной антенны, электромагнитная волна вызывает в ней переменный ток той же частоты, на которой работает передатчик. Важнейшим этапом в

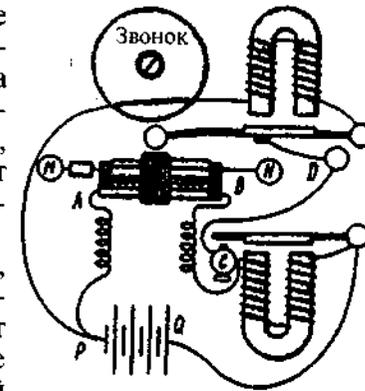


Рис. 195

развитии радиосвязи было создание в 1913 году лампового генератора незатухающих электромагнитных колебаний. Этот генератор позволил передавать высококачественную передачу звуков с помощью электромагнитных волн.

**Радиотелефонная связь.** Радиотелефонная связь работает по такому же принципу. Под давлением звуковых волн мембрана телефона приходит в колебательное движение и возникают электрические колебания, по форме похожие на звуковые. Но эти волны нельзя передавать на длинные расстояния: так как колебания звуковой частоты являются очень слабыми, электромагнитные колебания такой частоты не излучаются. Поэтому перед распространением их модулируют.



### Вопросы для самопроверки

1. В чем состоит идея А.С. Попова? 2. Когда он создал и продемонстрировал свой первый радиоприемник? 3. Что использовал А.С. Попов в качестве регистратора электромагнитной волны? 4. Для какой цели использовался когерер? 5. Объясните принцип работы первого радиоприемника. 6. Какое строение имеет когерер? 7. Что происходит, когда электромагнитная волна достигает когерера? 8. На сколько уменьшалось сопротивление когерера в опытах Попова? 9. Что сделал Попов, чтобы повысить чувствительность радиоприемника? 10. На каком расстоянии была установлена первая радиосвязь? А последующие? 11. Чем современные радиоприемники похожи на радиоприемник Попова и чем отличаются? 13. В чем суть принципа радиосвязи? 14. Что представляет собой радиотелефонная связь?



### 20. Модуляция и детектирование

**Содержание:** передача радиоволн; модуляция; осуществление процесса модуляции; детектирование; современный радиопередатчик и радиоприемник, самый простой радиоприемник.

**Передача радиоволн.** Основу современного радиопередатчика составляет ламповый, или транзисторный, генератор незатухающих колебаний. Генератор создает высокочастотные колебания, которые называют “несущими” (рис. 196). Если передатчик передает такие незатухающие синусоидальные волны, приемная антенна регистрирует гармоническое колебание, не несущее никакой информации. Чтобы передать какую-нибудь информацию, речь или музыку, надо изменить характер высокочастотных колебаний, например амплитуду. Этот процесс называется *модуляцией*.

Рис. 196

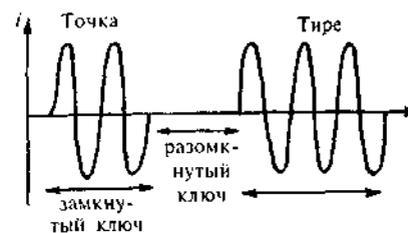
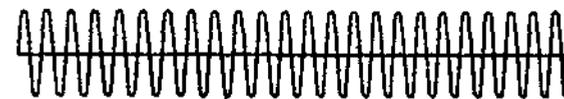


Рис. 197

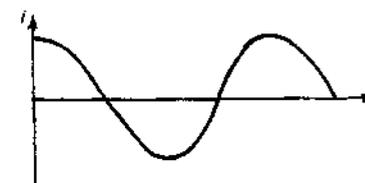


Рис. 198

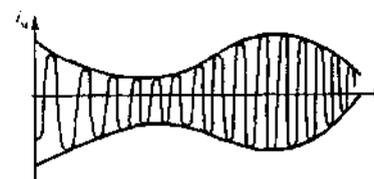


Рис. 199

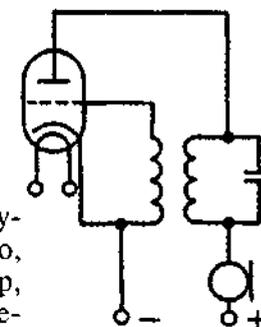


Рис. 200

**Модуляция.** Без модуляции нельзя осуществить никакую связь: телеграфную, телефонную, телевизионную. Например, телеграфная модуляция основана на прерывании сигнала, т.е. передаче короткого (точка) и длинного (тире) сигнала (азбука Морзе) (рис. 197). Также имеются колебания некоторой звуковой частоты (рис. 198). Эти колебания называют модулирующими колебаниями. “Несущие” колебания изменяются с помощью колебаний звуковой частоты, т.е. звуковые колебания модулируются. Вид модулированных колебаний приведен на рисунке 199. Модуляция бывает двух типов. Например, как мы видели выше, амплитуду высокочастотного колебания можно изменять с помощью колебаний звуковой частоты. Такую модуляцию называют амплитудной. Также можно соответствующим образом изменить частоту “несущего” колебания. Этот метод называют частотной модуляцией.

**Осуществление процесса модуляции.** К цепи генератора для передачи звуковых колебаний подключают микрофон (рис. 200). Под действием, подающем звуковые колебания, изменяется сопротивление микрофона и в результате изменяется ток в первой обмотке трансформатора. Это же приводит к появлению переменной ЭДС во вторичной обмотке трансформатора и, значит, к подаче на сетку лампы переменного напряжения

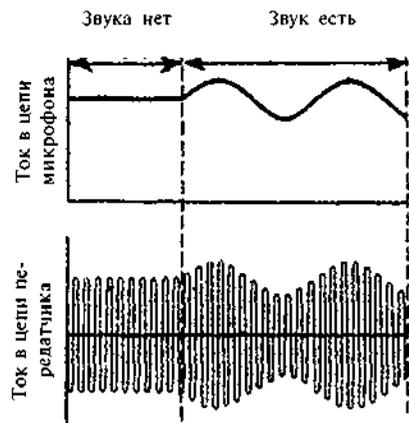


Рис. 201

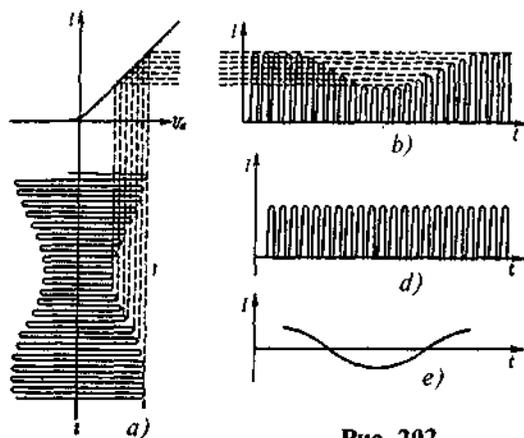


Рис. 202

звуковой частоты. Частота высокочастотного колебания, возбуждаемого в контуре этой лампой, будет изменяться в такт низкочастотного колебания в сетке. В результате изменяется интенсивность радиоволн, излучаемых антенной.

Отсутствие звука по цепи микрофона течет постоянный ток (рис. 201). С появлением звуковых колебаний изменяется ток в цепи микрофона. Тогда амплитуда высокочастотного колебания изменяется с частотой низкочастотного колебания, т.е. происходит амплитудная модуляция.

**Радиоприемник.** Радиоприемник в основном состоит из следующих элементов: антенна, колебательный контур, усилитель, детектор (повторитель), динамик. На антенну радиоприемника одновременно приходят модулированные сигналы, распространяемые многими станциями. Для выделения из этих сигналов только интересующего нас сигнала используется детектор. В контур

вводится конденсатор переменной емкости, изменяя емкость конденсатора, можно изменять собственную частоту контура. Таким образом, происходит настройка частоты контура с частотой принимаемого электромагнитного колебания. В результате в колебательном контуре возникает слабый модулированный ток высокой частоты (рис. 202 а). Этот ток после усиления подается на детектор. После детектора ток поступает на динамик, где воспроизводятся колебания низкой частоты, т.е. на микрофоне слышен звук.

**Детектирование.** Детектированием называется процесс выделения из высокочастотных несущих колебаний низкочастотного звукового колебания.

В детекторах происходит разделение высокочастотных несущих и низкочастотных колебаний, т.е. процесс детектирования. Роль детектора может выполнять элемент с односторонней проводимостью — двухэлектродная лампа или полупроводниковый диод. Через диод течет прерывистый модулированный высокочастотный ток (рис. 202 б). Низкочастотный сигнал выделяется фильтром, состоящим из параллельно соединенных конденсатора и сопротивления. Для низкочастотного (звукового) тока сопротивление конденсатора будет очень большим, и поэтому ток течет через сопротивление (рис. 202 в). Высокочастотный ток же течет через конденсатор (рис. 202 г).

**Современный радиопередатчик и радиоприемник.** Схема современного радиопередатчика и радиоприемника приведена на рисунке 203.

Генератор незатухающих колебаний вырабатывает высокочастотные колебания. В тот же момент звуковые колебания при помощи микрофона превращаются в электрические колебания. Оба колебания подаются в модулятор. В модуляторе осуществляется амплитудная, или частотная, модуляция. При передаче речи, музыки модуляция происходит на звуковой частоте  $(10 + 13) \cdot 10^3$  Гц. Модулированные колебания усиливаются и подаются на антенну, являющуюся открытым колебательным контуром, распространяющим электромагнитные волны в эфир.

Электромагнитные волны, достигшие антенны приемника, возбуждают в колебательном контуре электромагнитные колебания. Затем эти колебания усиливаются и детектируются. Выделенные низкочастотные сигналы усиливаются и подаются на динамик.

**Самый простой радиоприемник.** Схема самого простого радиоприемника приведена на рисунке 204. Цепь его состоит из антенны, колебательного контура, детектора, конденсатора и телефона.

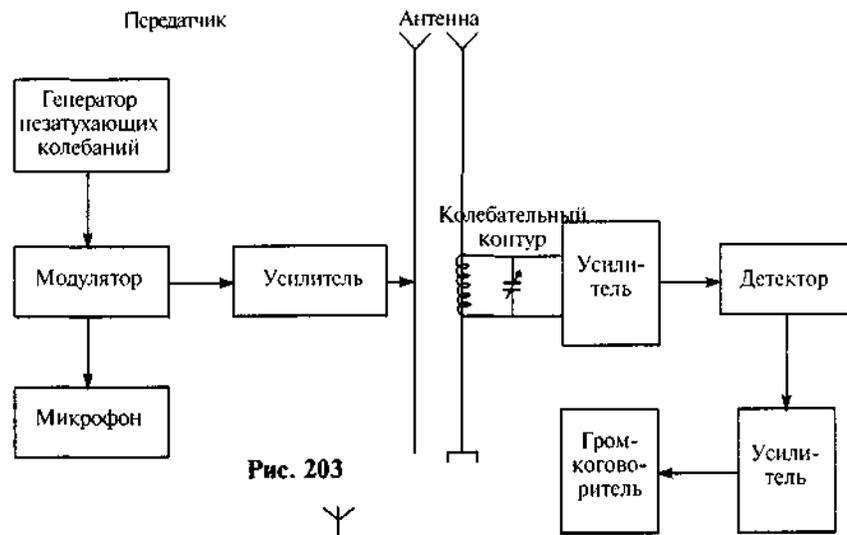


Рис. 203

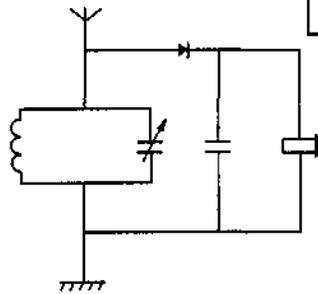


Рис. 204



**Вопросы для самопроверки**

1. Что составляет основу радиопередатчика? 2. Какую функцию выполняет генератор незатухающих колебаний? 3. Какие колебания называют «несущими» колебаниями? 4. Что называют модуляцией? 5. Можно ли установить радиолокатор без модуляции? 6. Какие колебания называют модулирующими колебаниями? 7. Каким образом модулируются звуковые колебания? 8. Какие бывают виды модуляций? 9. В чем суть процесса модуляции? 10. В чем суть процесс амплитудной модуляции? 11. Для чего нужен в радиоприемнике колебательный контур? 12. Из чего состоит функция конденсатора переменной емкости, находящегося в контуре? 13. Через какие процессы до микрофона проходят колебания, принятые в контуре? 14. Что называют детектированием? 15. Какую функцию выполняет диод? 16. Что выделяют звуковые колебания? 17. Объясните процесс выделения. 18. На какой частоте в современных радиоприемниках модулируется звук? 19. Объясните процесс передачи и приема радиоволн. 20. Объясните принцип работы самого простого радиоприемника.

Содержание: физические основы телевидения; передача и прием телепередач через спутники; Ташкент — родина телевидения.

**Физические основы телевидения.** Принцип телевидения не сильно отличается от схемы радиопередач. Отличие заключается в том, что в передающем устройстве высокочастотные колебания модулируются не только низкочастотными сигналами, но и видеосигналами. Преобразование изображения кадра в электрические сигналы производится с помощью вакуумной электронной трубки — иконоскопа.

Полученные из иконоскопа электрические колебания передаются на радиопередатчик и распространяющаяся волна модулируется точно так, как переменный ток в цепи от микрофона модулирует радиоволны.

Сигналы, получаемые в приемнике, преобразуются в видимое изображение вакуумной электронно-лучевой трубкой — кинескопом. Как движется электронный луч в передатчике, точно так же в кинескопе электронный луч повторяет движение луча. Телевизионные сигналы передаются только в диапазоне ультракоротких волн. Такие сигналы принимаются лишь в пределах прямой видимости. Например, Останкинская телевизионная башня высотой 540 м обеспечивает уверенный прием телепередач в радиусе 130 км. Построенная в 1985 году Ташкентская телевизионная башня высотой 375 м обеспечивает телепередачи в радиусе 100 км (рис. 205).

**Передачи и прием телепередач через спутники.** Для передачи телевизионных вещаний на дальние расстояния используются специальные устройства (ретрансляторы). Использование спутников связи позволяет передавать и принимать телевизионные вещания в любой



Рис. 205

точке земного шара. Сигналы передаются на спутники, спутник же ретранслирует их на антенны, расположенные в определенной области. Такие спутники обычно работают на геостационарных орбитах. Например, сейчас на таких орбитах работают более десяти российских спутников. На этих спутниках имеется 70 передатчиков (ретрансляторов) и 50 из них выделены для передачи телевизионного вещания. Следует отметить, чтобы разместить спутник в какой-то точке космоса, необходимо взять разрешение у международного общества электросвязи.

**Ташкент — родина телевидения.** Не все, наверное, знают, что Ташкент является родиной телевидения. Первый образец современных телевизоров был изобретен в нашей стране. В 1928 году ташкентские изобретатели Б. Грабовский и И. Белинский создали аппарат, передающий и принимающий изображение из одного места в другое с помощью электронного луча, — “радиотелефон”. 4 августа 1928 года этот простой “телевизор” в работе был продемонстрирован общественности. Жаль, но в свое время на это изображение не было обращено соответствующего внимания. В Узбекистане телевизионные вещания официально начались 5 ноября 1956 года.

В настоящее время оснащенное самыми современными приборами Узбекское телевидение ведет передачи на 5 каналах.



#### Вопросы для самопроверки

1. Похож ли принцип осуществления телевидения на схему радиопередачи? 2. В чем различия между ними? 3. Каким образом изображение преобразуется в радиосигналы? 4. Куда передаются электрические сигналы, полученные из иконоскопа? 5. Какое устройство преобразовывает полученные сигналы в видеоизображения? 6. В каком диапазоне волн осуществляется телепередача? 7. Чему равна высота Останкинской телебашни и на какое расстояние обеспечивается уверенный прием телеизображений? 8. А Ташкентской телебашни? 9. Чему равна высота Ташкентской телебашни и когда она была введена в строй? 10. Как передаются на длинные расстояния телепередачи? 11. Можно ли использовать искусственные спутники для телепередач? 12. Как осуществляется передача телепередач через спутник? 13. Где располагаются эти спутники? 14. Где и кем был изобретен первый образец современных телевизоров? 15. Когда в Узбекистане официально были начаты телепередачи?



**Содержание:** радиолокация; радиоастрономия.

**Радиолокация.** Обнаружение и точное определение местоположение объектов с помощью радиоволн называют *радиолокацией*. В основе радиолокации лежит регистрация отраженного от исследуемого объекта ультракоротких волн. Радиолокатор (radar) состоит из передатчика и приемника, имеющего общую антенну, обеспечен устройством перевода из режима приема в режим передачи. Антенна создает остро направленное излучение — радиолуч. Излучение производится в виде коротких импульсов длительностью  $10^{-6}$  с. После излучения антенна автоматически переходит в режим приема, отраженного от объекта электромагнитных волн. Регистрируется время прохождения радиоволн до цели и обратно и определяется расстояние до цели или скорость движения.

Радиолокация и работающие по этому принципу приборы широко применяются в военных и мирных целях. С их помощью осуществляются работы по управлению движениями воздушных и морских судов и определению расстояния до других планет, наблюдение за движениями метеоритов и других космических объектов.

**Радиоастрономия.** *Радиоастрономией* называют раздел астрономии, основанный на исследовании небесных тел по их радиоизлучениям. Радиоастрономические наблюдения осуществляются с помощью радиотелескопов. Радиотелескоп состоит из антенны и чувствительного радиоприемника с усилителем. Наземные наблюдения ведутся на длине волны порядка от нескольких десятков метров до миллиметра. Волны с меньшими длинами волн наблюдаются из космоса.

Самый распространенный вид радиотелескопа — это телескоп с антеннами в виде параболических зеркал (диаметром до 100 м). Падающий на антенну параллельный пучок лучей, отразившись, собирается на излучающем устройстве, находящемся на фокусе. Такой телескоп регистрирует радиоизлучения сантиметрового и даже миллиметрового диапазона. Один из самых больших радиотелескопов — это расположенный на Кавказе радиотелескоп РАТАН—600. Он состоит из 900  $7,4 \times 2$ -метровых отражателей, расположенных в виде окружности диаметром 588 м.

Источниками излучения в радиоастрономии являются галактики, межзвездная галактическая среда, звезды, Солнце, планеты, Луна и другие объекты.

В 1963 году радиоастрономы открыли новые небесные объекты — квазары (от лат. “звездоподобные радиоисточники”). Один из известных в науке пульсаров был зарегистрирован в Крабовидной туманности.

Современные исследования дают возможность изучать не только источники космического излучения (нейтронные звезды, квазары и т.д.), но и их спектры. Было изучено множество спектров химических элементов, органических и неорганических молекул, на их основе были сделаны выводы об образовании звезд и планетных систем. Такие исследования продолжаются и в настоящее время.

Было образовано еще множество разделов науки, связанных с изучением применения электромагнитных волн. К ним относятся: радиоспектроскопия, радиолокация, радиоастрономия, радиометрия, радиоэлектроника и другие.



### Вопросы для самопроверки

1. Что называют радиолокацией? 2. В чем суть принципа радиолокации? 3. Каково устройство радиолокатора? 4. В чем суть принципа работы радиолокатора? 5. Где применяются радиолокаторы? Приведите три примера. 6. Что изучает радиоастрономия? 7. Как осуществляются радиоастрономические наблюдения? 8. Каково устройство радиотелескопа? 9. Каково устройство телескопа с параболическим зеркалом? 10. В чем суть принципа работы такого телескопа? 11. Какие волны принимает такой телескоп? 12. Что вы знаете о радиотелескопе РАТАН? 13. Какие открытия были сделаны при помощи радиотелескопов? 14. Можно ли изучать строение молекул с помощью электромагнитных волн? 15. Какие науки и разделы наук, связанные с применением электромагнитных волн, вы знаете?

## § 125. Современные средства связи. Система связи в Узбекистане

**Содержание:** современные средства связи; телефонная связь в Узбекистане; сотовые средства связи; электронная почта и система Интернет.

**Современные средства связи.** До XX века система связи в основном состояла из фельдъегерской и специальной связи. Но прошедший век привел к резкому изменению сети связи. Среди них самый распространенный вид — это телефонная связь. Не зря изобретение телефонного коммутатора считается самым великим изобретением XX века. В настоящий же момент средства сотовой связи, электронная почта и система связи Интернет стала неотъемлемой частью нашей жизни. Принцип работы этих систем не сильно отличается от принципа работ первых радиотелефонных средств связи, только они осуществляются посредством новейших достижений науки и техники, современных компьютеров и космических спутников.

**Телефонная связь в Узбекистане.** Впервые в Ташкенте телефонная станция на 200 номеров была введена в строй в 1904 году. В настоящее время в телефонных сетях общего пользования имеется более 1,5 млн телефонных номеров. В Узбекистане большое внимание уделяется и междугородной телефонной связи. Сейчас в республике в междугородной телефонной сети имеется более 2500 каналов. В городе Ташкенте межстанционные направления оснащены волоконно-оптическими средствами связи. В 1992 году японская фирма «NEK» поставила оборудование, которое позволило абонентам выйти в международную телефонную систему, а также была построена и введена в строй 150-канальная космическая телефонная станция, что позволило обеспечить двухсторонние международные телевизионные вещания. Впоследствии турецкие фирмы «NETASH», «TELETASH», «SIMKO» построили в Ташкенте еще одну международную космическую станцию на 30 номеров. В настоящее время 80% международных телефонных переговоров осуществляется через искусственные спутники связи.

**Средства сотовой связи.** В 1991 году совместное предприятие «UZDUNROBITA» (ныне МТС), организованное Узбекистаном и компанией «InternationaI — kommunikeyshn grupp» США в 1995 году ввело в строй станцию сотовой связи, позволившую организовать международную, междугородную и внутригородскую телефонную связь в городах Ташкенте, Самарканде, Ургенче, Карши, Андижане и Бухаре. С 1997 года начали действовать еще пять таких станций. Это «UZMAKOM», «COSKOM», «UNITEL», «BUZTON» и др. Сейчас в нашей стране число пользователей такими средствами связи перевалило за 100 тыс. человек.

**Электронная почта и система Интернет (Internet).** Успехи в развитии компьютерной техники и средств связи привело к появлению новой системы связи — электронной почты и сети Интернет. В настоящее время большое количество сведений и документов передается посредством модемов через компьютеры. Интернет же превратился в свою очередь во всемирную информационную сеть, а также с помощью компьютеров стал средством общения и связи. В настоящее время услугами сети Internet пользуются более 300 млн человек. В Узбекистане тоже резко растет число пользователей услугами сети Internet. К концу 1999 года число провайдеров доходило до 8, а пользователей было около 2500, к 2005 году число пользователей сетью Internet дошло до 1 000 000. Особенно радует, что к системе Internet подключаются учебные заведения, в том числе академические лицеи и профессиональные колледжи.



### Вопросы для самопроверки

1. Какими средствами связи пользовались до XX века? 2. Что является великим открытием XX века? 3. Отличается ли от первых радиотелефонов принцип работы современных средств связи? 4. Когда и где в Узбекистане была построена первая телефонная станция? Какова была ее емкость? 5. Сколько телефонных номеров используется в настоящее время в Узбекистане? 6. Сколько каналов имеется в междугородной связи? 7. Какой процент международных переговоров в Узбекистане осуществляется при помощи искусственных спутников? 8. Когда в Узбекистане начали функционировать средства сотовой связи? 9. В чем суть принципа работы электронной почты и сети Internet? 10. Сколько людей во всем мире пользуются услугами сети Internet? А в Узбекистане?



### Образцы решения задач

**Задача 1.** В радиоприемнике имеется два коротковолновых диапазона: 41—75 м и 24,8—33,3 м. Вычислите соответствующие частотные диапазоны:

**Дано:**

$$\lambda_1 \rightarrow 41 - 75 \text{ м};$$

$$\lambda_2 \rightarrow 24,8 - 33,3 \text{ м}.$$

$$v_1 = ?, v_2 = ?$$

**Решение.** Частота и длина волны электромагнитных волн связаны следующим образом:

$$v = \frac{c}{\lambda},$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость электромагнитной волны (света) в вакууме. При помощи данных находим:

$$v_1 = \frac{3 \cdot 10^8}{41} \text{ МГц} = 7,3 \text{ МГц}, v_1 = \frac{3 \cdot 10^8}{75} \text{ Гц} = 4 \text{ МГц},$$

$$v_2 = \frac{3 \cdot 10^8}{24,8} \text{ Нз} = 12,1 \text{ МГц}, v_2 = \frac{3 \cdot 10^8}{33,3} \text{ Гц} = 9 \text{ МГц},$$

$$\text{Ответ: } v_1 = 4 \text{ МГц} + 7,3 \text{ МГц};$$

$$v_2 = 9 \text{ МГц} + 12,1 \text{ МГц}.$$

**Задача 2.** На каком расстоянии от антенны радиолокатора находится объект, если отраженный от него сигнал возвратился обратно через 200 мкс?

**Дано:**

$$t = 200 \text{ мкс} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с};$$

$$s = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

$$l = ?$$

**Решение.** Когда электромагнитная волна доходит до объекта и возвращается, она проходит путь в два раза длиннее расстояния до него (один раз чтобы прийти + один раз возвратиться). Таким образом,

$$2l = c \cdot t,$$

$$l = \frac{c \cdot t}{2}.$$

При помощи численных значений данных находим:

$$l = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{2} \text{ м} = 3 \cdot 10^4 \text{ м} = 30 \text{ км}.$$

$$\text{Ответ: } l = 30 \text{ км}.$$



### Задачи для самостоятельного решения

1. В каком диапазоне длин волн может работать приемник, если емкость конденсатора в его колебательном контуре плавно изменяется от 50 до 500 пФ, а индуктивность катушки постоянна и равна 2 мкГн? (60 + 190 м)
2. Скорость распространения электромагнитных волн в какой-то среде составляет 250 км/с. Найти их длину в среде, если частота в вакууме этих волн составляет 1 МГц. ( $\lambda = 250$  м)
3. Каким может быть максимальное число импульсов, испускаемых радиолокатором в 1 с, при разведывании цели, находящейся в 30 км от него? ( $N=5000$ )

### Тестовые вопросы

1. Ограничена ли скорость распространения электромагнитных волн в пространстве и с какой скоростью она распространяется?

- A. Ограничена, 300 000 км/с.
- B. Бесконечна.
- C. Ограничена, 30 000 км/ч.
- D. Ограничена 300 000 000 м/с.
- E. Правильные ответы A и D.

2. Что называют колебательным контуром?

- A. Систему, состоящую из закрытой цепи с транзистором.
- B. Закрытую цепь, состоящую из катушки и емкости.

**Единицы измерения в СИ физических величин, имеющих собственные имена**

Величина	Единица	
	название	обозначение
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Плоский угол	радиан	рад.
Телесный угол	стерадиан	ср
Сила, вес	ньютон	Н
Давление	паскаль	Па
Напряжение (механическое)	паскаль	Па
Модуль упругости	паскаль	Па
Работа, энергия	джоуль	Дж
Мощность	ватт	Вт
Частота колебания	герц	Гц
Термодинамическая температура	кельвин	К
Разность температур	кельвин	К
Теплота, количество теплоты	джоуль	Дж
Количество вещества	моль	моль
Электрический заряд	кулон	Кл
Сила тока	ампер	А
Потенциал электрического поля	вольт	В
Электрическое напряжение		
Электрическая емкость	фарад	Ф
Электрическое сопротивление	ом	Ом
Электрическая проводимость	сименс	С
Магнитная индукция	тесла	Тл
Магнитный поток	вебер	Вб
Индуктивность	генри	Гн

**Приставки для образования кратных и дольных единиц**

Множитель	Приставка	Обозначение приставки		Множитель	Приставка	Обозначение приставки	
		международное	русское			международное	русское
10 <sup>18</sup>	экса	Е	Э	10 <sup>-1</sup>	деци	d	д
10 <sup>15</sup>	пета	P	П	10 <sup>-2</sup>	санتي	с	с
10 <sup>12</sup>	тера	T	Т	10 <sup>-3</sup>	милли	m	м
10 <sup>9</sup>	гига	G	Г	10 <sup>-6</sup>	микро	μ	мк
10 <sup>6</sup>	мега	G	М	10 <sup>-9</sup>	нано	n	н
10 <sup>3</sup>	кило	M	к	10 <sup>-12</sup>	пико	p	п
10 <sup>2</sup>	гекто	g	г	10 <sup>-15</sup>	фемто	f	ф
10 <sup>1</sup>	дека	d	да	10 <sup>-18</sup>	атто	a	а

- С. Автоколебательную закрытую систему.
- D. Детекторную закрытую систему.
- E. Правильного ответа нет.

3. Как называется в радиосвязи изменение низкочастотных звуковых колебаний с помощью высокочастотных и колебаний?

- A. Модуляция.
- B. Детектирование.
- C. Передача.
- D. Прием.
- E. Амплитудная модуляция.

4. Как называется метод определения местонахождения тела и расстояния до него при помощи радиоволн?

- A. Радиоастрономия.
- B. Радиолокация.
- C. Радиотелескоп.
- D. Радиоприемник.
- E. Модуляция.

**Основные выводы**

Распространение электромагнитного поля в пространстве называют электромагнитной волной.

Электрическое и магнитное поля взаимосвязаны и составляют единое электромагнитное поле.

*Энергия электромагнитного поля:*

$$W = W_c + W_m, \quad w = w_c + w_m, \quad \omega = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}.$$

Скорость распространения электромагнитной волны равна:

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}.$$

Колебательным контуром называется, устройство, распрост-

раняющее электромагнитную волну с частотой  $\nu = \frac{c}{\lambda_0}$ .

Открытый колебательный контур изобрел немецкий физик Г. Герц.

*Модуляцией* называют изменение “несущих” колебаний звуковыми колебаниями.

Процесс выделения из высокочастотных несущих колебаний колебания звуковой частоты называют *детектированием*.

Обнаружение и точное определение местонахождения объектов с помощью радиоволн называют *радиолокацией*.

*Радиоастрономией* называют раздел астрономии, основанный на изучении небесных тел испускающими или собственными радиолучами.

### Некоторые астрономические величины

Радиус Земли	$6,37 \cdot 10^6$ м
Масса Земли	$5,98 \cdot 10^{24}$ кг
Радиус Солнца	$6,95 \cdot 10^8$ м
Масса Солнца	$1,98 \cdot 10^{30}$ кг
Радиус Луны	$1,74 \cdot 10^6$ м
Масса Луны	$7,33 \cdot 10^{22}$ кг
Расстояние от центра Земли до центра Солнца	$1,49 \cdot 10^{11}$ м
Расстояние от центра Земли до центра Луны	$3,84 \cdot 10^8$ м
Период вращения Луны вокруг Земли	27,3 день.ночь = $2,36 \cdot 10^6$ с

### Плотности твердых тел и жидкостей ( $10^3$ кг/м<sup>3</sup>)

#### Твердые тела

Алюминий	2,70
Висмут	9,80
Вольфрам	19,3
Железо (чугун, сталь)	7,87
Золото	19,3
Поваренная соль	2,20
Латунь	8,55
Марганец	7,40
Медь	8,93
Никель	8,80
Платина	21,4
Свинец	11,3
Серебро	10,5
Уран	18,7

#### Жидкости (при 15 °С)

Вода (при 4 °С)	1,00
Глицерин	1,26
Керосин	0,8
Масло (оливковое, применяемое для смазки)	0,9
Кунжутное масло	0,96
Ртуть	13,6
Сульфид углерода	1,26
Спирт	0,8
Эфир	0,7

### Плотности газов при нормальных условиях (кг/м<sup>3</sup>)

Азот	1,25
Аргон	1,78
Водород	0,09
Воздух	1,29
Гелий	0,18
Кислород	1,43

### Постоянные упругости твердых тел (округленные значения)

Вещество	Модуль Юнга, ГПа	Модуль сдвига, ГПа
Алюминий	69	24
Вольфрам	380	140
Железо (сталь)	200	76
Медь	98	44
Серебро	74	27

### Критические параметры и поправки Ван-дер-Ваальса

Газ	Критическая температура, $T_{кр}$ , К	Критическое давление, $p_{кр}$ , МПа	Поправки Ван-дер-Ваальса	
			$a, \text{Н} \cdot \text{м}^4/\text{моль}^2$	$b, 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$
Азот	126	3,39	0,135	3,86
Аргон	151	4,86	0,134	3,22
Водяной пар	647	22,1	0,45	3,04
Кислород	155	5,08	0,136	3,17
Неон	44,4	2,72	0,209	1,07
Углекислый газ	304	7,38	0,361	4,28
Хлор	417	7,71	0,650	5,62

### Коэффициент поверхностного натяжения жидкостей, $\sigma$ (мН/м)

Вода	73
Глицерин	62
Мыльный раствор	40
Ртуть	$5,0 \cdot 10^2$
Спирт	22

### Скорость звука $v$ , м/с

В воде	1450
В воздухе (при нормальном условии, сухой).	332

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	3
Место физики в изучении природы и ее значение в развитии других наук .....	4
Сведения из развития физики .....	6
Вклад мыслителей Востока в естествознание .....	7
Работы, проводимые в Узбекистане по развитию физики .....	10
Физические величины. Система единиц .....	12

### МЕХАНИКА

#### Глава I. Кинематика

§ 1. Общие понятия о движении. Система отсчета .....	15
§ 2. Векторные величины. Действия над векторами .....	17
§ 3. Перемещение и путь .....	20
§ 4. Прямолинейное равномерное движение. Скорость .....	21
§ 5. Ускорение и его составляющие .....	23
§ 6. Формула скорости и пути при прямолинейном равнопере- менном движении. Графическое изображение движения .....	25
§ 7. Криволинейное движение и характеризующие его величины .....	27
<i>Образцы решения задач</i> .....	31
<i>Тестовые вопросы</i> .....	32
<i>Основные выводы</i> .....	33

#### Глава II. Динамика

§ 8. Первый закон Ньютона .....	34
§ 9. Второй закон Ньютона .....	36
§ 10. Третий закон Ньютона .....	39
§ 11. Силы трения .....	40
§ 12. Силы инерции .....	43
<i>Образцы решения задач</i> .....	44
<i>Тестовые вопросы</i> .....	46
<i>Основные выводы</i> .....	46

#### Глава III. Закон сохранения

§ 13. Закон сохранения импульса .....	47
§ 14. Энергия, работа и мощность .....	49
§ 15. Механическая энергия .....	51
§ 16. Закон сохранения энергии .....	52
§ 17. Абсолютно упругое и неупругое соударение тел .....	53
<i>Образцы решения задач</i> .....	55
<i>Тестовые вопросы</i> .....	57
<i>Основные выводы</i> .....	57

#### Глава IV. Силы притяжения

§ 18. Закон всемирного тяготения .....	58
§ 19. Поле притяжения. Сила тяжести и вес. Невесомость .....	59
§ 20. Космическая скорость .....	62
<i>Образцы решения задач</i> .....	64
<i>Тестовые вопросы</i> .....	66
<i>Основные выводы</i> .....	66

#### Глава V. Механика твердых тел

§ 21. Моменты инерции и силы. Уравнение динамики вращатель- ного движения твердого тела .....	68
§ 22. Момент импульса и закон его сохранения .....	71
§ 23. Деформация твердого тела .....	73
§ 24. Равновесие твердого тела. Элементы статики .....	75
<i>Образцы решения задач</i> .....	76
<i>Тестовые вопросы</i> .....	78
<i>Основные выводы</i> .....	79

#### Глава VI. Механика жидкостей и газов

§ 25. Давление в жидкостях и газах. Закон Паскаля и Архимеда .....	80
§ 26. Неразрывность и уравнение Бернулли .....	82
§ 27. Движение тел в жидкостях и газах .....	83
<i>Образцы решения задач</i> .....	84
<i>Тестовые вопросы</i> .....	85
<i>Основные выводы</i> .....	86

#### Глава VII. Колебания и волны

§ 28. Гармонические колебания и их характеристики. Пружинный и математический маятник .....	87
§ 29. Волны. Характеристики волн, отражение и преломление волн .....	90
§ 30. Звуковые волны .....	92
<i>Образцы решения задач</i> .....	95
<i>Тестовые вопросы</i> .....	97
<i>Основные выводы</i> .....	98

#### Глава VIII. Основы специальной теории относительности

§ 31. Принцип относительности в механике. Преобразования Галилея .....	99
§ 32. Постулаты специальной теории относительности .....	102
§ 33. Преобразования Лоренца и их результаты .....	103
§ 34. Релятивистская формула сложения скоростей .....	107
§ 35. Релятивистская масса и релятивистский импульс. Связь между массой и энергией .....	108
<i>Образцы решения задач</i> .....	111
<i>Тестовые вопросы</i> .....	112
<i>Основные выводы</i> .....	113

## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

### Глава IX. Основы молекулярно-кинетической теории

§ 36. Характеристики молекул. Размеры молекул .....	116
§ 37. Идеальный газ и его параметры .....	118
§ 38. Силы взаимодействия между молекулами и энергия .....	121
§ 39. Опытные законы идеального газа. Уравнение Клапейрона—Менделеева .....	125
§ 40. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа .....	129
<i>Образцы решения задач</i> .....	132
<i>Тестовые вопросы</i> .....	133
<i>Основные выводы</i> .....	134

### Глава X. Основы термодинамики

§ 41. Внутренняя энергия системы. Равномерное распределение внутренней энергии по степеням свободы .....	137
§ 43. Теплоемкость. Удельная теплоемкость. Уравнение теплового баланса .....	141
§ 44. Первый закон термодинамики и его применение .....	143
§ 45. Второй закон термодинамики .....	145
§ 46. Принцип работы тепловой машины. Коэффициент полезного действия тепловой машины. Цикл Карно .....	147
§ 47. Тепловые двигатели. Охрана окружающей среды .....	150
<i>Образцы решения задач</i> .....	154
<i>Тестовые вопросы</i> .....	156
<i>Основные выводы</i> .....	157

### Глава XI. Агрегатные состояния веществ

§ 48. Реальный газ. Уравнение состояния реального газа .....	158
§ 49. Испарение и конденсация. Насыщенный пар. Изотермы Ван-дер-Ваальса. Критическое состояние .....	160
§ 50. Сжижение газов .....	164
§ 51. Влажность воздуха. Точка росы .....	165
§ 52. Атмосфера и гидросфера. Атмосфера планет .....	167
§ 53. Кипение. Образование пара и уравнение теплового баланса при конденсации .....	171
§ 54. Свойства жидкости. Поверхностное натяжение. Энергия поверхностного слоя .....	173
§ 55. Смачивание. Давление под искривленной поверхностью жидкости. Капиллярность .....	177
§ 56. Твердые тела. Моно- и поликристаллы. Полимеры .....	180
§ 57. Типы кристаллов. Дефекты. Жидкие кристаллы .....	183
§ 58. Механические свойства твердых тел .....	186
§ 59. Тепловое расширение .....	189
<i>Образцы решения задач</i> .....	193
<i>Тестовые вопросы</i> .....	195
<i>Основные выводы</i> .....	195

## ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

### Глава XII. Электрическое поле

§ 60. Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда .....	197
§ 61. Закон Кулона .....	200
§ 62. Электростатическое поле. Напряженность электростатического поля .....	201
§ 63. Принцип суперпозиции для электростатического поля. Поле диполя .....	205
§ 64. Работа напряженности электростатического поля .....	206
§ 65. Потенциал. Разность потенциалов .....	208
§ 66. Связь между напряженностью электростатического поля и разностью потенциала. Эквипотенциальные поверхности ..	211
§ 67. Диэлектрики. Поляризация диэлектриков .....	213
§ 68. Проводники в электрическом поле .....	217
§ 69. Электрическая емкость. Конденсаторы. Соединение конденсаторов .....	219
§ 70. Энергия заряженного конденсатора .....	224
§ 71. Энергия электростатического поля .....	224
<i>Образцы решения задач</i> .....	225
<i>Тестовые вопросы</i> .....	227
<i>Основные выводы</i> .....	228

### Глава XIII. Законы постоянного тока

§ 72. Сила и плотность тока .....	230
§ 73. Сторонние силы. Электродвижущая сила и напряжение .....	233
§ 74. Закон Ома для участка цепи .....	236
§ 75. Сопrotивление проводников. Зависимость сопротивления проводника от температуры .....	237
§ 76. Закон Ома для полной цепи .....	240
§ 77. Соединение проводников .....	241
§ 78. Соединение источников электрической энергии .....	242
§ 79. Работа и мощность тока. Закон Джоуля — Ленца .....	243
<i>Образцы решения задач</i> .....	245
<i>Тестовые вопросы</i> .....	247
<i>Основные выводы</i> .....	248

### Глава XIV. Электрический ток в различных средах

§ 80. Электрический ток в металлах .....	249
§ 81. Работа выхода .....	251
§ 82. Явления эмиссии и их применение .....	253
§ 83. Электрический ток в газах. Самостоятельный и несамостоятельный разряд .....	256
§ 84. Понятие о плазме .....	261
§ 85. Электрический ток в электролитах. Электролитическая диссоциация. Электролиз .....	263

§ 86. Законы электролиза Фарадея .....	266
§ 87. Применение электролиза в технике .....	267
§ 88. Превращение химической энергии в электрическую .....	268
§ 89. Строение полупроводников .....	271
§ 90. Проводимость полупроводников и ее зависимость от температуры и освещенности .....	273
§ 91. Полупроводниковые приборы .....	276
<i>Образцы решения задач</i> .....	279
<i>Тестовые вопросы</i> .....	281
<i>Основные выводы</i> .....	281

## Глава XV. Магнитное поле

§ 92. Магнитное поле. Контур с током .....	283
§ 93. Вектор индукции магнитного поля. Напряженность магнитного поля .....	287
§ 94. Закон Био—Савара—Лапласа .....	290
§ 95. Закон Ампера .....	293
§ 96. Взаимодействие параллельных токов .....	294
§ 97. Магнитный поток .....	296
§ 98. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле .....	297
§ 99. Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца .....	298
§ 100. Магнитосфера Земли и ее взаимодействие с солнечным ветром .....	300
§ 101. Природа диа-, пара- и ферромагнетизма .....	301
§ 102. Магнитная запись информации. Магнитная память ЭВМ. Магнитные диски и их использование .....	305
<i>Образцы решения задач</i> .....	307
<i>Тестовые вопросы</i> .....	310
<i>Основные выводы</i> .....	310

## Глава XVI. Электромагнитная индукция

§ 103. Явление электромагнитной индукции. Опыты Фарадея .....	311
§ 104. Вихревое электрическое поле. Вихревые токи .....	314
§ 105. Индуктивность контура. Самоиндукция. Взаимная индукция .....	315
§ 106. Трансформаторы .....	319
§ 107. Энергия магнитного поля .....	322
<i>Образцы решения задач</i> .....	323
<i>Тестовые вопросы</i> .....	324
<i>Основные выводы</i> .....	325

## Глава XVII. Электромагнитные колебания

§ 108. Свободные электромагнитные колебания .....	326
§ 109. Автоколебания. Генератор незатухающих колебаний .....	329
§ 110. Вынужденные электромагнитные колебания. Резонанс .....	332

§ 111. Переменный ток. Генератор переменного тока .....	334
§ 112. Активное сопротивление, емкость и индуктивность в цепи переменного тока .....	336
§ 113. Закон Ома для электрической цепи переменного тока .....	339
§ 114. Работа и мощность переменного тока .....	341
§ 115. Понятие о трехфазном токе .....	343
§ 116. Перспективы электрификации в Узбекистане .....	344
<i>Образцы решения задач</i> .....	347
<i>Тестовые вопросы</i> .....	349
<i>Основные выводы</i> .....	350

## Глава XVIII. Электромагнитные волны

§ 117. Вихревое электрическое поле. Ток смещения .....	351
§ 118. Уравнение Максвелла для электромагнитного поля .....	352
§ 119. Электромагнитные волны и их свойства .....	354
§ 120. Вибратор Герца. Открытый колебательный контур .....	358
§ 121. Изобретение радио. Понятие о радиосвязи .....	360
§ 122. Модуляция и детектирование .....	362
§ 123. Физические основы телевидения. Ташкент — родина телевидения .....	367
§ 124. Использование электромагнитных волн .....	369
§ 125. Современные средства связи. Система связи в Узбекистане .....	370
<i>Образцы решения задач</i> .....	372
<i>Тестовые вопросы</i> .....	373
<i>Основные выводы</i> .....	374
<i>Приложение</i> .....	375