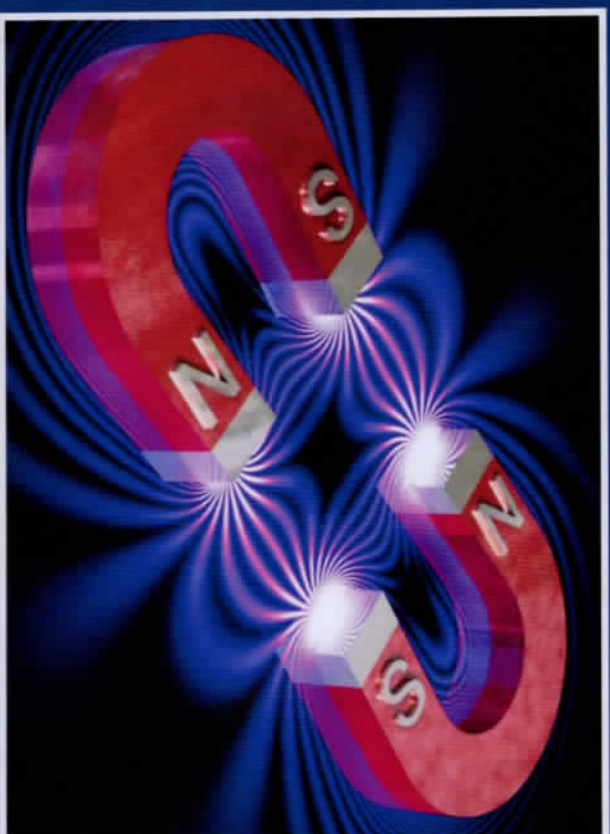


М.Б. Дусмұратов,  
Ш.Б. Ахмедов, Л.Ю. Тураева

# ФИЗИКА

(ОСНОВЫ  
ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ)

(ЧАСТЬ II)



МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

М.Б. Дусмуратов, Ш.Б. Ахмедов, Л.Ю. Тураева.

# ФИЗИКА

(Основы Электродинамики)  
(II Часть)

- Электростатика
- Законы постоянного тока
- Электрический ток в различных средах
- Магнетизм
- Механические колебания и волны
- Электрические колебания и электромагнитные волны



«YANGI CHIRCHIQ

BOOK

ЎЗБЕКИСТОН RESPUBLIKASI OLIY TA'LIM,  
TA'LIM VA INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI

CHIRCHIQ DAVLAT PEDAGOGIKA UNIVERSITETI

AXBOROT RESURS MARKAZI

Данный учебник написан на основании примерной программы по "Физике", утвержденной Министерством высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан и предназначен для академических лицеев с углубленным изучением физики. В нем освещены такие разделы как механика, основы молекулярной физики и термодинамика, основы электродинамики, оптика, атомная и ядерная физика и физика элементарных частиц. В конце каждой главы даны примерные решения задач и даны тесты и задания для самостоятельного решения. В приложении учебника приведены табличные данные для решения задач, различные физические постоянные величины, даны определения единиц измерения основных физических величин.

This coursebook has been created on the basis of exemplary curriculum in "Physics" confirmed by the Ministry of higher and secondary specialized education of the Republic of Uzbekistan and it is appropriate to be used at the academic lyciums where physics is a specialized discipline. The coursebook comprises the units concerning mechanics, the bases of molecular physics and thermodynamics, the bases of electrodynamics, optics and the physics of atom, nuclear and elementary particles. At the end of each unit there are examples and tests and examples for solving independently. In appendix there are tables, different physical constants and descriptions of physical units of measurements.

Министерство высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан  
Издание разрешено приказом № 302 от 09.09.2022.

**Рецензенты:**

К.Т. Суворов	-	Доцент д.ф.н. заведующий кафедрой "Методика преподавания физики и астрономии" ТУЧПТИ
Н.З. Кожирова	-	Заведующий кафедрой "Физика", академический лицей имени И.Каримова
Р.Г. Касимов	-	Полковник, директор академический лицей имени "Темурбеклар мактаби"
У.Б. Абдиев	-	Доктор наук по педагогических наук, заведующий кафедрой «Теоретическая физика», Термезского государственного педагогического университета
Ф.Т. Баймуратов	-	Доктор философий по физика-математическим наукам (PhD), доцент кафедры «Физика и электротехника», Ташкентского текстильного и легкопромышленного института

**ПРЕДИСЛОВИЕ**

Физика это наука, изучающая явления природы, свойства вещества и поля, их причины и закономерности. Физика происходит от греческого слова "physis" – природа, что означает наука о природе. Первым, кто начал изучать физику, был древнегреческий мыслитель Аристотель (до н. э. 384–322 гг.) в своей 8-томной книге. В результате открытия всех новых явлений в технике и природе и их практического применения из физики выделились физико-химическая, астрофизическая, геофизическая, биофизическая и другие самостоятельные науки. Среди естественных наук физика занимает особое место, она изучает все формы движения материи. В результате воздействия различных проявлений и свойств материи на наши органы чувств в нашем сознании эти воздействия формируют представления об объективном существовании. Поэтому изучение природы начинается с наблюдений. Иногда органов чувств бывает недостаточно для наблюдения за физическими явлениями. В этом случае человек проводит наблюдения с помощью измерительных приборов. Результаты наблюдений – путем систематизации фактов, иногда путем проведения специальных опытов выявляют те общности и взаимосвязи, которые существуют между теми или иными свойствами материи. Связь между фактами, относящимися к конкретному явлению, определяется в виде формулы или закона. Но нельзя сказать, что физика состоит из законов и фактов. Действительно, существует связь между фактами и законами.

Как мы знаем, основная цель преподавания физики заключается, во-первых, в научном объяснении фундаментальных законов природы, в развитии у учащихся навыков научного мировоззрения и философских рассуждений, в формировании представлений о физических процессах, объясняющих принципы работы техники и приборов, используемых в быту, а во-вторых, в создании прочной основы для продолжения образования, углубления полученных знаний и продолжения дальнейших научных исследований.

Этот учебник также был подготовлен на основе учебной программы, разработанной для академических лицеев с углубленным изучением физики, исходя из вышеуказанных целей. Настоящий учебник разработан в соответствии с постановлением Президента Республики Узбекистан от 3 декабря 2020 года № ПП-4910 «О системе отбора одаренной молодежи и мерах по совершенствованию деятельности академических лицеев», утвержденной заместителем премьер-министра Республики Узбекистан 8 мая 2021 года. В программе мероприятий по совершенствованию системы создания учебной литературы-учебников, учебных и учебно – методических пособий на основе образовательных и предметных программ, адаптированных к двуязычному периоду для академических лицеев и разработан в целях обеспечения выполнения поставленных задач.

Учебник состоит из трех частей, вторая часть учебника посвящена основам электродинамики, в которой написаны такие главы, как электроstaticка, электрический ток в различных средах, магнетизм, механические и электрические колебания, механические и электромагнитные волны. При изучении темы в каждой главе были тщательно проанализированы многочисленные материалы по теме, а также были приняты во внимание последовательность и междисциплинарность темы. Тематические рисунки и графики получены с помощью современных программ, которые служат для расширения физического представления учащихся о предмете.

Каждая тема учебника разбита на более мелкие темы, которые служат для конкретизации знаний у учащихся. После каждой темы дается несколько вопросов по теме и решение нескольких вопросов, что приводит к повторному запоминанию темы и формированию у учащихся навыков. После каждой главы даны лабораторные задания по данной главе, тесты и задания для самостоятельного решения. Кроме того, приводятся краткие сведения о жизни и творчестве ученых, внесших значительный вклад в развитие физики, проводивших фундаментальные опыты и принимавших законы. При освещении темы учебника учитывалась возрастная психология учащихся. Использование учебника также полезно для старшеклассников и учащихся средних школ, поступающих в высшие учебные заведения, а также для учителей физики, специализирующихся на физико-математических науках, что значительно повышает их уровень знаний по физике.

# ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

*Электродинамика – раздел физики, изучающий электромагнитные взаимодействия заряженных тел между собой и с окружающей электромагнитного поля и его специфические законы, передающие этот эффект и являющиеся особым видом материи.*

*Например, из четырех основных типов передачи эффектов, которые наука определила до сих пор: гравитационное, электромагнитное, ядерное и слабое взаимодействия, электромагнитное взаимодействие является наиболее распространительным и занимает неровное место по своему разнообразию.*

*Примерами являются сила трения поверхности, сила сопротивления среды, сила Кулона, сила Ампера, сила Лоренца, сила упругости, сила реакции основания и другие силы. Хотя на первый взгляд кажется, что силы упругости, трения, сопротивления и реакции являются механическими силами, на самом деле почти все механические силы являются электромагнитными силами. Это потому, что при ближайшем рассмотрении молекул и атомов, из которых состоит вещество, имеют электронные оболочки, и через эти оболочки возникают силы притяжения и отталкивания. Когда местоположение атомов и молекул изменяется, одна из сил притяжения или отталкивания через эти электронные оболочки становится доминирующей. Именно тогда возникает вышеупомянутые механические силы.*

*Итак, в этом учебнике мы изучим раздел «Основы электродинамики» в 5 частях:*

- Электростатика
- Законы постоянного тока
- Электрический ток в разных средах
- Магнетизм
- Электрические колебания и электромагнитные волны.

## ГЛАВА. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Раздел электродинамики, изучающий неподвижные электрически заряженные тела, называется электростатикой. Поле, создаваемое неподвижным зарядом или заряженным телом, называется электростатическим полем или, электрическим полем. В этой главе мы расскажем об электрическом заряде и его двух видах, законе взаимодействия электрических зарядов, электрическом поле, работе, выполняемой при перемещении заряда в электрическом поле, эквипотенциальных поверхностях и его свойствах, свойствах проводников и диэлектриков, электрических цепях, электрической емкости и др.



### § 1. РАЗЛИЧНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

#### Электризация тел:

Очень давно известно, что при расчесывании сухих волос расческой расческа притягивает к себе легкие предметы (например, мелкие кусочки бумаги) (рис.1.1). Хотя причина этого явления интересовала многих, она оставалась неизвестной до XVIII (восемнадцатого) века. Это явление получило название «электризация» (слово электричество происходит от греческого слова «электрон» – янтарь).

В XVI веке английским ученым Джилбертом был проведен ряд опытов, в ходе которых было установлено, что кроме янтаря стекло, эбонит, алмаз, горный хрусталь, сера, смола и другие подобные предметы притягивают к себе что-то легкое при трении о шелк, шерсть, мех. Кроме того, в дополнение к втиранию расчески в волосы, когда вы втираете стекло или пластику в мех или волосы, когда вы втираете бутылку в кожу, она также притягивает к себе что-то легкое.

При трении тел друг о друга наблюдается электризация. По мере того, как наэлектризованные тела приобретают свойство притягивать к себе другие более мелкие тела, то есть создавать в них электрические заряды. Чтобы наэлектризовать макроскопическое тело, необходимо отделить часть отрицательного заряда от связанного с ним положительного заряда. Если сухие волосы несколько раз расчесать расческой, то часть электронов,

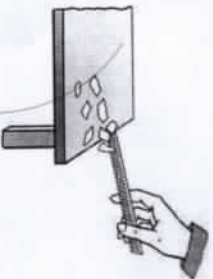


Рисунок 1.1

которые очень подвижны, будут проходить от волос к расческе и заряжать ее отрицательно, при этом волосы будут заряжаться отрицательно.

Из этого можно сделать вывод, что трущиеся тела производят электрические заряды. Но на самом деле электрические заряды присутствуют во всех телах, потому что частицы с электрическим зарядом являются неотъемлемой частью атомов и молекул во всех телах.

Оказывается, электризация возникает не только при трении тел друг о друга, но и при прикосновении наэлектризованного тела к другому телу. Такое наэлектризование называется наэлектризацией на ощупь. При электризации прикосновением В результате перемещения электрического заряда от одного тела к другому второе тело также электризуется.

При трении синтетических тканей электризация становится сильнее. При снятии капроновой рубашки в сухом воздухе издается хриплый звук. Между заряженными частями трущихся поверхностей вспыхивают мелкие искры. Даже такие маленькие искры при работе с легко воспламеняющимися веществами вред ли вызовут большой пожар. На производственных предприятиях приходится учитывать такие явления.

Например, на текстильных фабриках нити разрываются, натягиваясь на катушки и катушки, в результате чего они электризуются за счет трения. Пряжа пачкается, притягивая к себе пыль. К ним придется принимать специальные меры.

#### Два вида электрического заряда, взаимодействие зарядов:

В 1733 году французский физик Шарль Дюфе (1698-1739) первым экспериментально определил появление двух типов электрических зарядов в трущихся телах. Он показал, что первый тип электрического заряда образуется в стекле, драгоценных камнях, волосах, мехе, а второй тип - в шелке янтарной смолы.

Позже условно первый вид электрического заряда стали называть зарядами, образующимися в стекле, натертом на кожу – положительными зарядами, а второй вид – зарядами, образующимися в янтаре, натертом на мех – отрицательными зарядами.

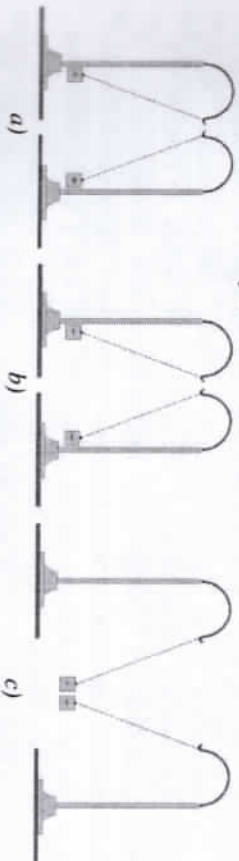


Рисунок 1.2

Мы также можем проверить их сами в эксперименте, используя гильзы (маленькую трубку, сложенную из бумаги и подвешенную на шелковой нити). Например, мы можем видеть, как две бутылки, натертые кожей, отскакивают друг от друга, когда они касаются двух рукавов, которые находятся рядом. Точно так же мы можем наблюдать предыдущую сцену, когда два эбонита, натертые на мех, также прикасаются к этим рукавам. Теперь мы видим, что стекло, натертое на коже, и эбонит, натертый на меху, притягиваются к гильзам при прикосновении к этим гильзам (рис. 1.2-а, б, с).

Электризуется не только при трении, но и при соприкосновении тел друг с другом. Целью растирания является увеличение контактной поверхности тел. Исследовав влияние электрических зарядов, был открыт следующий закон:

*Заряды одного и того же знака отталкиваются друг от друга, в то время как заряды разных знаков притягиваются. Эти силы называются электрическими силами.*

### **Нейтрализация электрических зарядов, понятие величины зарядов:**

Заряжаем две одинаковых гильзы, стоящих рядом, электричеством с разными названиями (рис. 1.3-а). В результате электрических сил они притягиваются друг к другу, а после прикосновения эффект между ними исчезает (рис. 1.3-б).

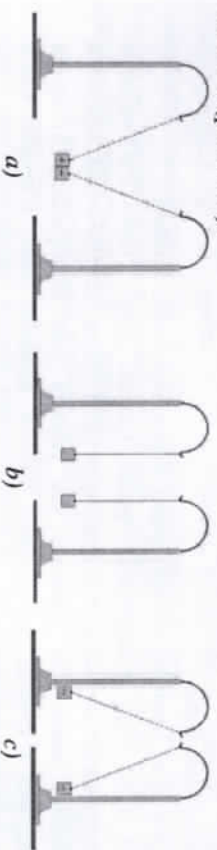


Рисунок 1.3

Потеря взаимодействия между назлектризованными телами после их прикосновения друг к другу называется нейтрализацией зарядов. Мнение о том, что при нейтрализации электрические заряды в телах терялись, ошибочно. Потому что при назлектризации объекта заряд не генерируется и не разрушается при нейтрализации. При нейтрализации заряд перераспределяется таким образом, что присутствие заряда не проявляется. Другими словами, в электрически нейтральном теле положительный и отрицательный заряды находятся в равных количествах. Заряд тела означает, что в нем остается больше заряда с именем. Так как в вышеописанном эксперименте гильзы имели одинаковое количество положительных и отрицательных зарядов, то и при их касании электрический эффект, как показано на рис. 1.3-б, терялся.

Пусть на рисунке 1.3-а в гильзах положительные и отрицательные заряды находятся в разных количествах, пусть количество, скажем, отрицательного заряда больше. Как только они соприкасаются, формируется пейзаж на рисунке 1.3-с. При этом сумма электрических величин, образующихся после прикосновения гильз друг к другу, равна разности величин зарядов, предыдущих прикосновению гильз друг к другу.

Поскольку отрицательный заряд больше, оба заряда становятся отрицательно заряженными, и эти одинаковые заряды избегают друг друга.

Таким образом, когда заряженное тело касается незаряженного тела, незаряженное тело получает электрический заряд, в то время как их суммарный заряд остается неизменным.

### **Электризация проводников и диэлектриков:**

Если электрический заряд подается на часть поверхности металлического тела, то эти заряды самопроизвольно распространяются по всей его поверхности. Тела, в которых электрические заряды могут свободно перемещаться, называются *проводниками*. К ним относятся металлы, уголь, графит, кислоты, щелочные растворы, основания, соли и др. В металлах валентные электроны во внешних оболочках атомов слабо связаны с ядром. Даже небольшое внешнее воздействие может разорвать эту связь и превратить ее в свободный электрон. При этом свободные электроны могут свободно перемещаться между узлами кристаллической решетки. Следовательно, эти электроны будут принадлежать не тому или иному атому, а всему кристаллу. Эти электроны называются электронами проводимости и участвуют в транспорте заряда из одного места в другое.

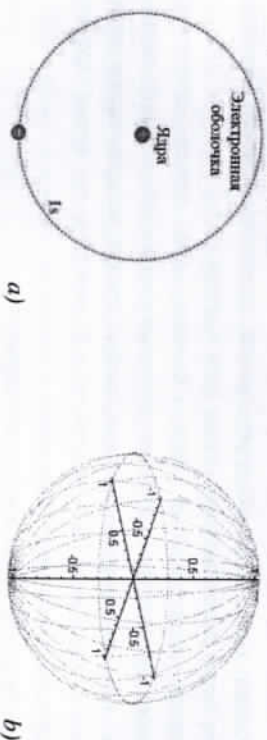
Существуют такие вещества, в которых электрические заряды не могут свободно перемещаться, и во время опытов они остаются там, где образовалось тело. Такие вещества называются *непроводящими, изоляторами или диэлектриками*. К ним относятся стекло, фарфор, смола, Калучук, шелк, эбонит, вода, парафин, газы и многие другие вещества.

В диэлектриках валентный электрон во внешней оболочке каждого атома прочно связан с ядром, и эта связь не может быть легко разорвана и превращена в свободный электрон. Следовательно, поскольку в диэлектриках свободных электронов, которые перемещают заряд из одного места в другое, значительно меньше, чем в проводниках, трудно свободно перемещать заряд из одного места в другое.

### **Понятие атомной структуры:**

Все вещества состоят из молекул и атомов. А атомы состоят из положительно заряженного атомного ядра и вращающихся вокруг ядра отрицательно заряженных частиц — электронов. Атомные ядра разных

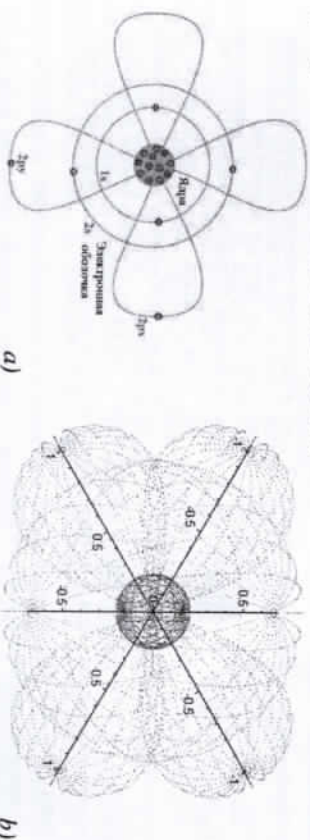
Химических элементов различны и различаются по массе и величине заряда. Что касается электронов, то они абсолютно одинаковы, но их расположение, количество различны в разных атомах. Практически вся масса атома будет воплощена в его ядре.



Рисуника 1.4

Атом водорода (H) имеет простейшее строение, вокруг ядра вращается только один электрон (рис.1.4-а,б). Ядро атома водорода называется протоном. Заряд протона положительный, а по величине равен электрону. Протон и электрон считаются частицами с наименьшим элементарным зарядом в природе.

Оказывается, размер атома водорода будет примерно в  $10^5$  раз больше размера ядра. 1.4-а, на рисунке представлено схематическое изображение атома водорода, а на рисунке 1.4-б изображено пространственное электронное облако. Эксперимент показал, что в более сложных атомах электроны располагаются послойно вокруг атомного ядра. В нейтральном атоме суммарный отрицательный заряд электронов будет коллественно равен положительному заряду ядра. Например, на рисунке 1.5-а схематично изображен атом углерода (C), а на рисунке 1.5-б изображена его пространственная электронная оболочка.



Рисуника 1.5

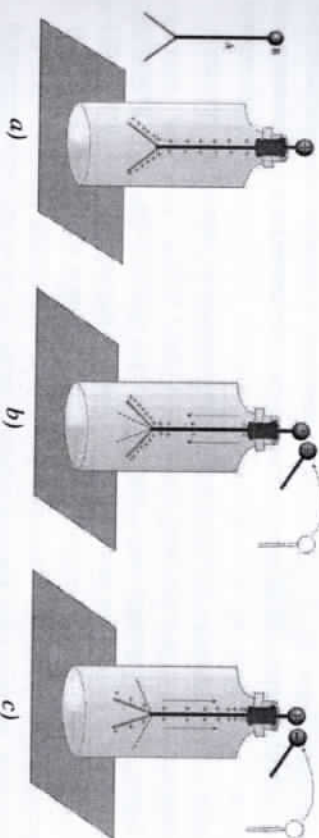
Поскольку заряды ядра и электронов имеют разные названия, электроны притягиваются к ядру. Электроны на самом внешнем слое называются

валентными электронами, и эти электроны слабо связаны с ядром. В веществах химические реакции осуществляются через эти валентные электроны. При трении тел, кроме него, только эти валентные электроны отрываются от ядра, становятся свободными электронами и перемещаются из одного места тела в другое или из одного тела в другое.

**Электрометр и электростатометр:**

Прибор, позволяющий определить, назлектризованы ли тела, называется электрометром. Его работа основана на законе взаимодействия зарядов. Электрометр состоит из стеклянной банки А и металлического стержня а, на верхний конек которого установлен металлический шарик В.

На нижний конек стержня наклеиваются тонкие лепестки из папирусной бумаги или алюминия, которые заряжаются одинаковыми знаками зарядами отталкиваются между собой. Чем больше лепестков развернуты под углом, тем больше они заряжены. (рис. 1.6-а).



Рисуника 1.6

С помощью электрометра также можно определить знак заряда других заряженных тел. Для этого достаточно приблизить это же заряженное тело к сфере В. Пусть электрометр будет иметь положительный заряд. Когда лепестки открываются, когда к нему приближается другое заряженное тело, это же тело также имеет положительный заряд, и наоборот, когда лепестки сближаются, это же тело заряжено отрицательно.

То есть к при приближении положительно заряженного тела к положительно заряженному шару часть заряда в шаре В результате отталкивания переходит к лепесткам в банке, а лепестки, отталкиваясь друг от друга, расширяются (рис.1.6-б). Напротив, когда отрицательно заряженное тело приближается к положительно заряженному шару В, в результате притяжения часть заряда в внутренних листьях перетекает в шарик В и по мере уменьшения заряда в листьях раздвигаются на меньший угол, чем раньше, т. е. листочки сближаются (рис.1.6-в).

Если металлический шарик в головке заряженного электроскопа поймать рукой, то заряд в электроскопе будет проходить через руку к телу человека и от него к Земле. В результате электроскоп разряжается, то есть полностью разряжается. При этом лепестки электроскопа не раздвигаются и занимают вертикальное параллельное положение. (рис. 1.7).

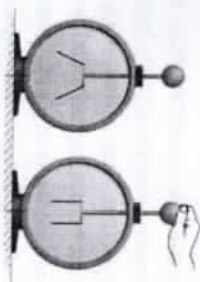


Рисунок 1.7

Выше, на рисунке 1.6, мы видели изменение угла между лепестками при приближении к заряженному электроскопу шариков с различными направленными зарядами. Оказывается, лепестки электроскопа могут открываться при приближении заряженного тела не только к заряженному электроскопу, но и к незаряженному (рис. 1.8)

Если к незаряженному электроскопу приблизить положительно заряженный стержень, то свободные электроны в проводящем стержне и лепестках электроскопа притягиваются к положительному заряженному стержню и собираются в направлении головки электроскопа. При этом головка электроскопа приобретает отрицательный заряд, а лепестки — положительный из-за недостатка электронов (рис. 1.8-б).

Если к незаряженному электроскопу приблизить отрицательно заряженный стержень, то свободные электроны в головке электроскопа будут отталкиваться от отрицательно заряженного стержня и собираться в сторону лепестков электроскопа. При этом головка электроскопа из-за недостатка электронов приобретает положительный заряд, а лепестки — отрицательный (рис. 1.8-с).

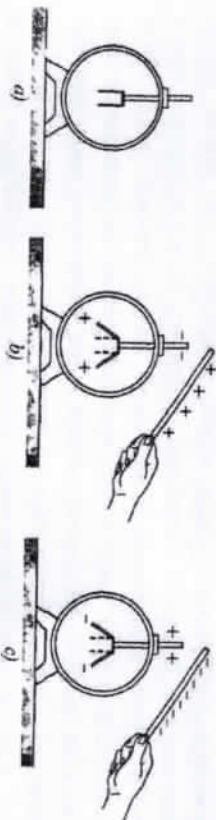


Рисунок 1.8

Еще одним из приборов, позволяющих определить наэлектризованность тел, является электрометр (рис. 1.9). В отличие от электроскопа, в электрометре проводник вместо лепестков имеет стрелку. Стрелка электрометра может свободно вращаться вокруг оси, проходящей немного выше центра тяжести. Чтобы повернуть стрелку от вертикали на угол  $\alpha$ , нужно будет приложить к ней какую-то силу  $F$  независимо от ее природы.

Эта сила также может быть силой отталкивания зарядов — Кулоновской силой. Нижний конец стрелки выровнен штрихами в диапазоне  $0 - 90^\circ$  с нижней стороны, чтобы показать заряд. Проводник в головке электрометра при попадании заряженного объекта в сферу заряд протекает в сферу. Затем заряд перетекает из сферы в стержень и стрелка электрометра, и они остаются с тем же знаковым зарядом. Поскольку одинаковые жестовые заряды отталкиваются, стержень и стрелка электрометра взаимно отталкиваются и открываются на некоторый угол. Отклонение стрелки электрометра указывает на то, что объект, прикоснувшийся или прикрученный к его стержню, имеет электрический заряд. Чем больше заряда подается на электрометр, тем на больший угол отклоняется его стрелка.

Следует особо отметить, что независимо от того, сколько заряда подается на электрометр, показания стрелки никогда не достигают угла  $90^\circ$ , что означает, что показания стрелки всегда находятся в пределах  $0 \leq \alpha < 90^\circ$ .

Точно так же лепестки электроскопа никогда не открываются до  $180^\circ$ , что означает, что угол между лепестками находится в пределах  $0 \leq \alpha < 180^\circ$ . Причина в том, что стрелки или лепестки имеют свой собственный вес, независимо от того, насколько они легкие.

#### Единица измерения заряда:

В СИ единица измерения заряда считается не основной единицей, а производной единицей, и эталон для нее не установлен. В СИ наруду с метром, секундой, килограммом используются еще одна основная единица измерения электрических величин, а именно единица силы тока — Ампер. Эталонное значение силы тока определяется магнитным действием токов. В СИ единица электрического заряда, называемая кулоном, определяется через единицу силы тока.

*1 Кулон (1 Кл) — это количество заряда, которое проходит через поперечное сечение проводника за 1 с, когда сила тока равна 1 А.*

*1 Кл — очень большой заряд. При расстоянии 1 км между двумя точечными зарядами по 1 Кл сила взаимодействия между ними будет несколько меньше силы притяжения к Земле груза массой 1 т. Поэтому нельзя давать заряд 1 Кл телам размером в несколько метров.*

Потому что заряженные частицы не могут удерживаться на поверхности объекта, отталкиваясь друг от друга. В этих условиях в природе нет другой силы, уравновешивающей силу отталкивания частиц друг от друга. Поэтому при решении задач используют доли заряда *1 Кл*.

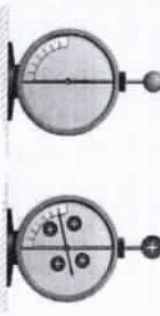


Рисунок 1.9



$$1 \text{ мкКл} = 10^{-6} \text{ Кл}, \quad 1 \text{ нКл} = 10^{-9} \text{ Кл}, \quad 1 \text{ пКл} = 10^{-12} \text{ Кл} \quad (1.1)$$

Это не означает, что можно получить произвольную долю электрического заряда  $1 \text{ Кл}$ . В природе существует наименьший электрический заряд, который является элементарным зарядом элементарных частиц. Этот заряд также известен как элементарная единица заряда или Квант электрического заряда. Элементарный заряд — это заряд электрона или протона в количественном выражении, который выглядит следующим образом:

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \quad (1.2)$$

Другими словами, количество заряда в  $1 \text{ Кл}$  будет равно  $6,2422 \cdot 10^{18}$  единицам элементарного заряда.

Наименьшая элементарная частица с отрицательным зарядом называется электроном. Его заряд  $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  и масса равны  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ . Наименьшая стабильная элементарная частица, состоящая из положительного заряда, называется протоном.

Заряд протона количественно равен заряду электрона, а знак противоположен, а масса в  $1836,1$  раза больше массы электрона, то есть заряд  $q_p = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  и масса протона равны  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ . Следовательно, количество заряда электрона и протона будет равно:

$$q_e = -e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}, \quad q_p = +e = +1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \quad (1.3)$$

Единица электрического заряда в СИ является произвольной величиной и равна заряду, проходящему через поперечное сечение проводника при токе силой  $1 \text{ А}$  за время  $1 \text{ с}$ . Это количество заряда называется  $1 \text{ Кулон (Кл)}$ .

**Закон сохранения электрического заряда:**

При электризации тел трением одновременно наэлектризуются оба тела, при этом одно из них заряжено положительно, а другое — отрицательно. Оба тела не будут заряжены до тех пор, пока они не станут электрически заряженными, количество положительного заряда первого тела будет равно количеству отрицательного заряда второго тела. Если эти два наэлектризованных тела объединяются, тела снова становятся разряженными, то есть нейтрализованными. На основании ряда опытов был открыт следующий закон сохранения электрических зарядов:

*Электрические заряды не возникают и не исчезают сами по себе, они лишь переходят от одного тела к другому или перераспределяются внутри данного тела, а алгебраическая сумма электрических зарядов в замкнутой системе остается неизменной.*

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const} \quad (1.4)$$

Согласно представлениям современности, электрический заряд имеет "атомную" структуру, то есть кратность электрического заряда любого тела состоит из положительных и отрицательных элементарных зарядов. Если говорить о единице элементарного заряда, равной  $e$ , то заряд любого тела равен кратному  $e$ , при зарядке тела заряд переносится на него  $0, \pm e, \pm 2e, \pm 3e, \dots, \pm Ne$ .

$$q = 0, \pm e, \pm 2e, \pm 3e, \dots, \pm Ne \quad (1.5)$$

Таким образом, говоря языком современной физики, электрический заряд квантуется, то есть количество заряда изменяется дискретно, а не непрерывно.

**Объемная, поверхностная, линейная плотность зарядов:**

Если заряд распространяется по всему объему тела, вводится понятие объемной плотности. Количество заряда, приходящееся на единицу объема, называется объемной плотностью и обозначается греческой буквой  $\rho$ . Формула средней объемной плотности будет выглядеть следующим образом:

$$\rho = \frac{Q}{V} \quad (1.6)$$

Если заряд распространяется по всей внешней поверхности тела, вводится понятие поверхностной плотности. Например, при зарядке пластинки или кристалла заряд распределяется по их поверхности. Количество заряда, приходящееся на единицу поверхности, называется поверхностной плотностью и обозначается греческой буквой  $\sigma$ . Формула средней поверхностной плотности будет:

$$\sigma = \frac{Q}{S} \quad (1.7)$$

Если заряженное тело имеет одну шкалу (например, такие объекты, как веревка, шнур, проволока, оцениваются только по длине), то заряд распределяется только по длине такого тела. При этом вводится понятие линейной плотности. Количество заряда, приходящееся на единицу длины, называется линейной плотностью и обозначается греческой буквой  $\tau$ .

$$\tau = \frac{Q}{l} \quad (1.8)$$

Общий заряд равномерно заряженного тела определяется по формуле:

$$Q = \rho V, \quad Q = \sigma S, \quad Q = \tau l \quad (1.9)$$

В общем случае заряд не распределяется равномерно по всему объему (поверхности, длине) тела. В каждой точке тела значения объемных (поверхностных, линейных) плотностей заряда различны. Чтобы найти плотность заряда в одной и той же точке тела, из заряда берется произведение объема (поверхности, длины) в этой точке.

$$\rho = \frac{dq}{dV}, \quad \sigma = \frac{dq}{dS}, \quad \tau = \frac{dq}{d\ell} \quad (1.10)$$

Чтобы найти общий заряд тела, плотность заряда интегрируется по объему (поверхность, длина).

$$Q = \int_V \rho dV, \quad Q = \int_S \sigma dS, \quad Q = \int_L \tau d\ell \quad (1.11)$$

Единицы измерения объемной, поверхностной и линейной плотностей соответственно:

$$\frac{C}{m^3}, \frac{C}{m^2}, \frac{C}{m}$$

Вопросы по теме:

1. Что называется электризацией?
2. Расскажите о знаках зарядов и о том, как они образуются.
3. Расскажите о принципе работы электроскопа и электрометра.
4. Дайте определение единице измерения заряда. Чему равен наименьший заряд?
5. Расскажите закон сохранения заряда и запишите формулу.
6. Опишите объемную, поверхностную и линейную плотности заряда и назовите их единицы измерения.
7. Какие тела могут заряжаться по объему, а какие по поверхности?

**Решение задач:**

1. Капля с зарядом  $+4e$  теряет 2 своих электрона в результате взаимодействия на нее света. Каким будет следующий заряд капли?

- A)  $+2e$     B)  $+6e$     C)  $+8e$     D)  $-8e$

**Дано:**

$q_1 = +4e$  Согласно закону сохранения заряда, общий заряд системы  
 $q_2 = -2e$  должен сохраниться.

$q_3 = ?$

$$q_1 = q_2 + q_3$$

$$q_3 = q_1 - q_2 = 4e - (-2e) = 6e$$

Следовательно, если объект теряет электрон, он становится положительным зарядным.

**Ответ:** B)  $+6e$ .

2. Тело имеет  $2 \cdot 10^4$  избыточных электронов. Найдите заряд тела (Кл).

**Дано:**

$$N = 1,2 \cdot 10^4$$

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

**Решение:** Заряд тела равен сумме зарядов электронов в нем, избыточных или отсутствующих:

$$q = N \cdot e$$

$$q = 2 \cdot 10^4 \cdot (-1,6 \cdot 10^{-19}) = -3,2 \cdot 10^{-15} \text{ Кл}$$

**Ответ:**  $-3,2 \cdot 10^{-15} \text{ Кл}$

**§ 2. ЗАКОН ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАРЯДОВ – ЗАКОН КУЛОНА**

Теперь перейдем к изучению законов описания электромагнитных взаимодействий с количественной стороны. Основным законом электростатики является закон взаимодействия между двумя заряженными неподвижными точечными телами или частями. Этот закон был открыт французским физиком Шарлем Кулоном в эксперименте в 1785 году, поэтому этот закон также носит его имя.

В природе нет точечных заряженных тел. Но если расстояние между телами во много раз больше их размеров, то форма и размеры заряженных тел не оказывают существенного влияния на силу взаимодействия между ними. Тела в этом случае можно рассматривать как точечные.

Сила взаимодействия между заряженными телами зависит от электрических свойств среды между этими телами. До сих пор мы говорим, что заряженные тела взаимодействуют в вакууме. Но, как показали опыты, воздух очень мало влияет на силу взаимодействия заряженных тел, то есть сила взаимодействия находится в воздухе почти так же, как в вакууме.

**Опыт Кулона, закон Кулона:**

Силы взаимодействия электрических зарядов, возникающие при отталкивании или притяжении электрических зарядов, называются электрическими силами. Электрические силы создаются электрическими зарядами и действуют на заряженные тела или частицы. В данной теме и далее при изучении силы действия заряженных тел будем рассматривать их как точечные заряды. Закон Кулона, который будет описан в этой теме, также действителен только для точечных зарядов.

*Точечным зарядом называют заряженные тела, размеры которых очень малы по сравнению с исследуемым расстоянием.*

Благодаря тому, что силы взаимодействия между электрическими зарядами велики, закон взаимодействия электрических зарядов легко найти. Здесь не было необходимости использовать высокочувствительные приборы, тогда как вся Вселенная должна была использовать высокочувствительные приборы для проверки закона гравитации на Земле.

Количественные исследования электрических эффектов впервые были обнаружены в 1785 году французским физиком Шарлем Кулоном (1736-1806) с помощью скручивающихся Весов (рис.2.1). Шкалы кручения позволяют исследовать зависимость силы взаимодействия между заряженными сферами от зарядов и расстояния между ними. В эксперименте использовались легкий стержень, подвешенный на эластичной нити. К концу стержня прикреплялись шары, подвешенные на эластичной нити. К концу стержня прикреплялись шары, подвешенные на эластичной нити. Шары, подвешенные на эластичной нити, могут двигаться в горизонтальной плоскости.

Шарль Огюстен де Кулон родился 1736 июня 14 года в Анжуле, Франция. Он французский ученый, известный своими работами по электричеству и магнетизму, а также исследованиями сил трения. В дополнение к изучению взаимодействия заряженных кулоновских тел, он также исследовал взаимодействие полюсов длинных магнитов

Он занимался статикой спиральных конструкций, а также изучал деформации при кручении и силы и моменты при кручении и использовал ее для количественных измерений электрических величин. Он публикует свою статью в 1773 году, в которой описывается связь между нормальной силой, приложенной к телу, и резцом, возникающая при этом. В течение 1785-1789 гг. он публиковал силы и законы взаимодействия электрических зарядов и магнитных полюсов в 7 своих статьях. В 1789 году он разрабатывает теорию трения скольжения. Шарль Кулон умер 23 августа 1806 года в Париже в возрасте 70 лет.



Шарль Огюстен де Кулон (1736-1806)

при приближении к ней другого заряженного шара, и зная угол этого поворота, был найден электрический эффект. При этом гравитационная сила не учитывается. Из опыта была определена взаимосключающая сила зарядов, и он наблюдал, что сила удара уменьшалась в четыре, девять, шестнадцать раз при увеличении расстояния между ними в два, три, четыре раза при сохранении количества зарядов. Установил, что сила Кулоновского взаимодействия (электрическая сила) обратно пропорциональна квадрату расстояния между центрами зарядов  $F \sim \frac{1}{r^2}$ .

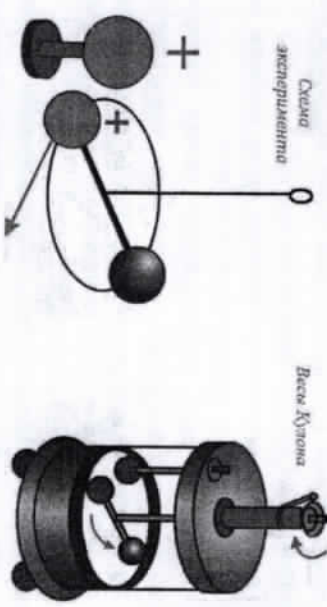


Рисунок 2.1

В те времена умели измерять силу и расстояние. Единственная сложность заключалась в измерении самого заряда. Не было даже единицы измерения заряда. Кулон нашел простой способ изменить заряд одного из шаров в 2, 4, 8 и т. д. раз. Для этого он толкнул шарик с зарядом в другой шарик с таким же зарядом. При этом заряд равномерно распределяется по двум сферам. В

результате заряд сферы с начальным зарядом уменьшился в 2 раза. В соответствии с этим получено новое значение силы взаимодействия.

Продолжая эксперимент, он заметил, что при уменьшении количества заряда в одной из сфер в два, три, четыре раза снова (касаясь таких незаряженных сфер) сила удара также уменьшалась в два, три, четыре раза. Кулон установил, что сила взаимодействия зарядов прямо пропорциональна количеству заряда в каждой сфере, иными словами, пропорциональна произведению  $F \sim q_1 \cdot q_2$ . Следовательно, оказывается, что заряды будут взаимодействовать силой  $F \sim \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$ . Закон Кулона определяется как:

В вакууме неподвижные точечные заряды, находящиеся на некотором расстоянии друг от друга, взаимодействуют друг с другом силой, направленной вдоль прямой, соединяющей эти заряды. Модуль этой силы равен произведению зарядов, обратно пропорционален квадрату расстояния между центрами зарядов.

Шарль Кулон перешел от пропорциональности к равенству введением коэффициента.

$$F_0 = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2.1)$$

Здесь:  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \left[ \frac{Н \cdot м^2}{Кл^2} \right]$  — коэффициент пропорциональности;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \left[ \frac{Кл^2}{Н \cdot м^2} \right] = \frac{\Phi}{M}$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, или электрическая постоянная.

Значение коэффициента пропорциональности состоит в следующем: Точечные заряды, находящиеся в вакууме на расстоянии  $1м$  друг от друга и имеющие величины зарядов от 1 Кл, взаимодействуют друг с другом с силой  $9 \cdot 10^9 Н$ .

Приведенная формула количественно характеризует Кулоновскую силу в вакууме. Для направленной характеристики кулоновской силы необходимо умножить величину кулоновской силы на единичный вектор, направленный вдоль силы взаимодействия. Кулоновская сила-это радиальная сила, то есть эта сила будет единичным вектором, поскольку она направлена вдоль линии, соединяющей центры зарядов  $\vec{r}_0 = \frac{\vec{r}}{r}$  будет. Отсюда следует, что направленные силы Кулона определяется по формуле:

$$\vec{F}_0 = F_0 \cdot \vec{r}_0 = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \cdot \vec{r} \quad (2.2)$$

Формулу величины и направления кулоновской силы в вакууме также можно записать в таком виде.

$$\vec{F}_0 = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 r^2} \cdot \vec{r}, \quad \vec{F}_0 = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 r^3} \cdot \vec{r} \quad (2.3)$$

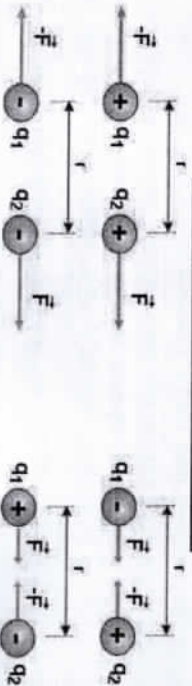


Рисунок 2.2

Если заряды имеют одинаковый знак, то  $q_1 q_2 > 0$ . При этом вектор  $\vec{F}_0$  совпадает с вектором  $\vec{r}$ , т. е. притягиваются заряды одного и того же знака. Если заряды имеют разный знак, то  $q_1 q_2 < 0$ . При этом вектор  $\vec{F}_0$  и вектор  $\vec{r}$  движутся в противоположных направлениях, т. е. отталкиваются заряды разной жесткости (рис.2.2).

**Диэлектрическая проницаемость среды:**

Вывод, который сделал Кулон о взаимодействии зарядов, был уместен только для зарядов, находящихся в воздухе. Однако последующие опыты и наблюдения на различных диэлектриках показали, что один и тот же заряд также зависит от диэлектрических свойств окружающей среды. Установлено, что диэлектрическое свойство среды уменьшает электрическую проводимость. Например, оказалось, что сила действия двух точечного заряда уменьшается в керосине в 2 раза, в воде в 81, в масле в 2,5 раза по сравнению с тем, что было в вакууме. Поэтому в формулу Закона Кулона был введен коэффициент, учитывающий электрическое свойство среды. Этот коэффициент, учитывающий электрические свойства среды, называется **относительной диэлектрической проницаемостью** среды и определяется по-гречески  $\epsilon$  (эпсилон).

Таким образом, для диэлектрической среды закон Кулона будет следующим:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2} = \frac{F_0}{\epsilon} \quad (2.4)$$

*Следовательно, диэлектрическая проницаемость среды — это физическая величина, характеризующая электрическое свойство вещества и показывающая, во сколько раз сила взаимодействия зарядов в этой среде меньше силы их действия в вакууме.*

$$\epsilon = \frac{F_0}{F} \quad (2.5)$$

Относительная диэлектрическая проницаемость для вакуума равна  $\epsilon = 1$ .

$$F = \frac{F_0}{\epsilon} = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon \epsilon_0 r^2} \quad (2.6)$$

Закон Кулона для диэлектрической среды также можно записать в таком виде, который характеризует ее количественно.

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^3} \cdot \vec{r}, \quad \vec{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon \epsilon_0 r^3} \cdot \vec{r} \quad (2.7)$$

**Сложение Кулоновской силы:**

Со временем вместо электрической силы стало употребляться выражение Кулоновская сила. Как и все силы, Кулоновская сила является векторной величиной. Для нахождения равнодействующих сил, действующих на заряд другими зарядами, к заряду складывается вектор каждой силы (рис. 2.3)

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n \quad (2.8)$$

Проекция равнодействующей силы на оси будут следующими:

$$\begin{cases} \vec{R}_x = \vec{F}_{1x} + \vec{F}_{2x} + \vec{F}_{3x} + \dots + \vec{F}_{nx} \\ \vec{R}_y = \vec{F}_{1y} + \vec{F}_{2y} + \vec{F}_{3y} + \dots + \vec{F}_{ny} \\ \vec{R}_z = \vec{F}_{1z} + \vec{F}_{2z} + \vec{F}_{3z} + \dots + \vec{F}_{nz} \end{cases} \quad (2.9)$$

Равнодействующие силы связаны через проекции следующим образом:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2} \quad (2.10)$$

Направление равнодействующей Кулоновской силы определяется по правилу направляющих косинусов. А опорные косинусы будут:

$$\cos \alpha = \frac{R_x}{R}, \quad \cos \beta = \frac{R_y}{R}, \quad \cos \gamma = \frac{R_z}{R} \quad (2.11)$$

С приведенными выше формулами мы также познакомились в разделе статика.

В некоторых случаях приходится работать с заряженными шарами, подвешенными на нитке.

Если на невесомых нитках в одной точке висят шарики одинаковой массы, одинаковыми знаками и разной величины заряда, то под действием силы Кулона шарики отталкиваются друг от друга, образуя с каждой из нитей

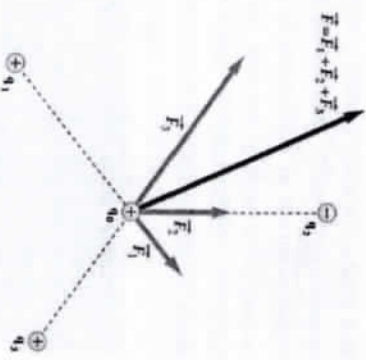


Рисунок 2.3

какой-то угол  $\alpha$  с вертикалью. При этом каждый шарик находится в равновесии с отклонением от вертикали на угол  $\alpha$  под действием трех сил — силы тяжести, силы тяжести и силы натяжения нити.

Сила подвески  $F_{Кл}$ , сила натяжения резьбы  $T$  и тангенс угла отклонения резьбы от вертикали  $tg\alpha$  будут следующими (рис. 2.4):

$$F_{Кл} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$\vec{T} + \vec{F}_{Кл} + m\vec{g} = 0$$

$$T = \sqrt{F_{Кл}^2 + (mg)^2} \quad (2.12)$$

$$tg\alpha = \frac{F_{Кл}}{mg} = \frac{r}{\ell}$$

На рис. 2.4 массы сфер равны между собой, но величины зарядов в этих сферах взаимно равны или неравны для случая, когда сферы симметричны относительно вертикальной оси и открыты на один и тот же угол  $\alpha$ .

Если массы шар не равны между собой, то эта симметрия нарушается, и сфера с большей массой отталкивается на меньший угол, и, наоборот, сфера с меньшей массой отталкивается на больший угол, то есть углы отклонения сфер от вертикали равны  $\alpha_1 \neq \alpha_2$ . По мере увеличения количества заряда в шарах угол отклонения также увеличивается. Отдельно следует отметить, что независимо от того, насколько велики величины зарядов в сферах, угол раскрытия нитей от вертикали будет меньше, чем, то есть  $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ . Другими словами, угол между нитями никогда не может быть равен  $180^\circ$ , то есть  $0 \leq 2\alpha \leq 180^\circ$ . Это связано с тем, что висающие на веревке воздушные шары, какими бы легкими они ни были, имеют свой собственный вес.

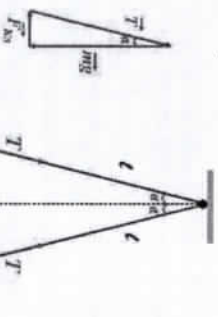


Рисунок 2.4

*Вопросы по теме:*

1. Как еще называют электрические силы. Когда и кем была открыта эта сила?
2. Напишите формулу закона Кулона, выражающую величину и направление для вакуума.
3. Напишите формулу закона Кулона, выражающую величину и направление для диэлектрической среды.
4. Что такое диэлектрическая проницаемость?
5. Запишите числовое значение коэффициента пропорциональности и электрической постоянной и единицу измерения. Что означает коэффициент пропорциональности?
6. Как добавляет несколько подвесных сил? Как определяется величина и направление равномерно действующей кулоновской силы?
7. Когда шарик заряда, висящие на нитях одинаковой длины, отклоняются от

вертикали на один и тот же угол, а когда на разные? Чем при этом будет равен угол наибольшего отклонения сферы от вертикали?

**Решение задачи:**

1. Во сколько раз увеличится сила, действующая на заряды, если в середине два одинаковых точечных заряда, ввести один и тот же третий заряд?

- A) 2 B) 4 C) 5 D) 8

**Решение:**

Дано:  $q_1 = q_2 = q_3 = q$

$F_2 = ?$



Согласно закону Кулона два заряда взаимодействуют со следующей силой:

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

В первом случае расстояние между двумя зарядами остается неизменным, а во втором случае третий заряд вводится в середине расстояния между ними.

$$1) F_1 = k \frac{q^2}{r^2}, \quad 2) F' = k \frac{q^2}{r^2}, \quad F'' = k \frac{q^2}{\left(\frac{r}{2}\right)^2} = 4k \frac{q^2}{r^2}$$

$$F_2 = F' + F'' = k \frac{q^2}{r^2} + 4k \frac{q^2}{r^2} = 5k \frac{q^2}{r^2}, \quad F_2 = 5F_1$$

Ответ: C) 5.

2. Два одинаковых шара массой по 4 г подвешивают в одной точке с помощью нитки одинаковой длины. Они заряжались одинаковыми зарядами. При этом шарик отталкивается друг от друга на 10 см. нити образовывали прямой угол. Найдите заряд каждой сферы (с).

Дано:

$m = 4 \text{ г} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$

$\alpha = 90^\circ$

$r = 10 \text{ см} = 10^{-1} \text{ м}$

$tg 45^\circ = 1$

$R = 10 \text{ м/с}^2$

$q = ?$

**Решение:**

В этом случае будет, как и в вопросе выше.

$$tg \frac{\alpha}{2} = \frac{F_k}{mg}, \quad \rightarrow F_k = mg \cdot tg \frac{\alpha}{2}$$

$$k \frac{q^2}{r^2} = mg \cdot tg \frac{\alpha}{2}$$

$$q = r \cdot \sqrt{\frac{mg \cdot tg \frac{\alpha}{2}}{k}} = 10^{-1} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot tg \frac{90^\circ}{2}}{9 \cdot 10^9}} = 2,1 \cdot 10^{-7} \text{ С}$$

Ответ:  $2,1 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$ .

3. На концах равностороннего треугольника со сторонами 20 см в воздухе помещаются заряды  $q_1=q_2=q_3=2 \cdot 10^{-6}$  К. Найдите силу воздействия других на один из зарядов (Н).

A) 1,56 B) 2,7 C) 2,95 D) 3,12

Дано:

$$a = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$$

$$q_1 = q_2 =$$

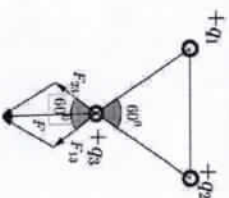
$$= q_3 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ С}$$

$$F = ?$$

Решение: Так как заряды частиц равны между собой, то и силы притяжения, которые они оказывают друг на друга, также равны:  $F_{13} = F_{23} = F^*$

Сила между двумя зарядами, как показано выше, равна:

$$F^* = k \frac{q^2}{d^2}$$



А общая сила по теореме косинусов и потому, что все стороны равны, а угол равен  $60^\circ$ :

$$F = \sqrt{3} F^* = \sqrt{3} \cdot k \frac{q^2}{a^2}, \rightarrow F = \sqrt{3} F^* = \sqrt{3} \cdot k \frac{q^2}{a^2} = \sqrt{3} \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(2 \cdot 10^{-6})^2}{(0,2)^2} = 1,56 \text{ Н}$$

Ответ: A) 1,56 Н.

### § 3. ПРИНЦИПЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, ЕГО СИЛОВЫЕ ЛИНИИ. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ.

*Принципы воздействия на расстоянии и вблизи:*

После того, как Исаак Ньютон открыл закон всемирного тяготения, достижения в области исследования солнечной системы настолько запутались и воображение ученых, что многие из них даже перешли на сторону мысли о том, что не стоит искать средству, передающую взаимодействие от одного тела другому. Тогда и возникла теория прямого воздействия издалека через пустоту. Согласно этой теории, воздействие передается в любой момент времени на любое отдаленное расстояние, объекты могут "воспринимать" существование друг друга, даже когда между ними нет среды.

Сторонники теории дальних воздействий утверждали: "Не смущайтесь тем фактом, что тело действует даже там, где его нет, вы не видите, как магнит или электрическая палочка притягивают тела прямо через пространство". При этом сила воздействия существенно не меняется даже при сминивание магнита на бумагу или при укладке в коробку. Кроме того, хотя кажется, что тело взаимодействуют, когда они касаются друг друга, на

самом деле это не так. Даже когда тело касается друг друга, между атомами и молекулами все равно остается пространство. Дистанционное воздействие — это единственный способ взаимодействия, который встречается повсюду.

Возражения, направленные против теории тесного взаимодействия, были очень сильными. Эта теория также была подтверждена замечательными достижениями Кулона и Ампера, которые открыли законы взаимодействия электрических зарядов и электрических токов и были сторонниками теории дальнего действия.

Когда мы наблюдаем воздействие двух тел, возникает вопрос, не является ли третий тел носителем воздействия здесь. Например, водитель нажимает кнопку открытия или тает ручку, чтобы открыть заднюю дверь автомобиля. При этом воздействие передается либо по электрическому сигналу, либо в последовательности механических сигналов на заднюю дверь, и дверь открывается. В обоих этих случаях есть передатчик воздействия. Если прерод, передающий электрический сигнал, отсоединен или одно из механических сигналов вышло из строя, то задняя дверь не открывается, так как пересекающие соединение отключено. Точно так же звуковые волны являются посредником — передатчиком воздействия при вызове человека на другом берегу реки.

Гипотеза о том, что взаимодействие между телами, находящимися на некотором расстоянии друг от друга, передается через промежуточные сигналы или среды, которые все время передают это взаимодействие из точки в точку, является сущностью теории тесного взаимодействия.

Многие ученые, которые являются сторонниками теории тесного взаимодействия, полагают, что вокруг планеты и вокруг магнитов существуют какие-то невидимые токи, вокруг наземтризованных тел-какие-то невидимые атмосферы, чтобы объяснить возникновение гравитационных и электромагнитных сил.

*Электрическое поле:*

Для передачи всех известных нам до этого времени воздействий необходимо было наличие посредника — материальной среды. Например, чтобы повзонтить в колокольчик, нужно будет либо раскачать нитку, привязав ее к языку колокольчика, либо бросить в колокол какой-нибудь камень. Здесь эффект передается двумя разными способами, но в обоих случаях есть передатчик эффекта (веревка или камень). Электрические эффекты передаются даже в вакууме, который не является средой. Так где же среда, передающая электрические воздействия? Электрические воздействия также передаются через специальную материальную среду — электрическое поле. Электрическое поле — это особый вид материи, образующийся вокруг

неподвижных зарядов. Электрическое поле также называют электростатическим полем. Таким образом, оказывается, что электрические заряды и электрическое поле являются двумя неразделимыми типами материи. Согласно представлениям английского физика Майкла Фарадея (1791-1867), неподвижные электрические заряды не взаимодействуют друг с другом напрямую. Каждый из них создает вокруг себя электрическое поле, и взаимодействие осуществляется через эти поля. Так же, как невозможно передать любой эффект в одно мгновение, электрический эффект не может быть передан в одно мгновение. Английский ученый Максвелл (1831-1879) исследовал передачу электрических и магнитных эффектов через поле и теоретически доказал, что эти эффекты распространяются в пространстве с конечной скоростью. Таким образом, полевое взаимодействие передается в пространстве равна со скоростью распространения света. Электрическое поле, создаваемое вокруг электрических зарядов, является материальным и распространяется до бесконечности, поэтому оно существует независимо от нас. Электрическое поле действует только на электрические заряды.

**Понятие напряженности электрического поля:**  
 Электростатическое (или кратко электрическое) поле, создаваемое вокруг неподвижного электрического заряда, проверяется с помощью заряда, называемого "пробным зарядом".

"Пробный заряд" относится к ничтожному заряду, который не сильно меняет очень малый положительный заряд, который не сильно меняет характер исследуемого поля.

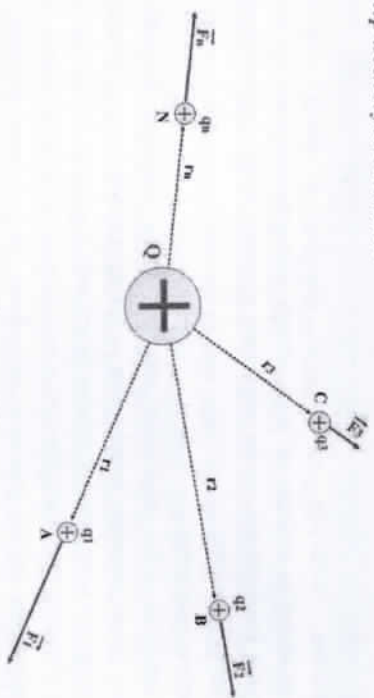


Рисунок 3.1

Пусть электрическое поле создаёт заряд  $Q, q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$  а пробный заряд вводятся в разные точки этого поля. Пусть силы, действующие электрическим полем на пробный заряд, совпадают  $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$  (рис.3.1).

Так как при делении этих сил на внесенные пробные заряды образуется величина, не зависящая от величины пробного заряда, то есть:

$$F_1 = k \frac{Qq_1}{\epsilon r_1^2}, \quad F_2 = k \frac{Qq_2}{\epsilon r_2^2}, \quad F_3 = k \frac{Qq_3}{\epsilon r_3^2}, \dots, \quad F_n = k \frac{Qq_n}{\epsilon r_n^2}$$

$$q_1 = k \frac{Q}{\epsilon r_1^2}, \quad q_2 = k \frac{Q}{\epsilon r_2^2}, \quad q_3 = k \frac{Q}{\epsilon r_3^2}, \dots, \quad q_n = k \frac{Q}{\epsilon r_n^2}$$

Относительные силы, действующей на пробный заряд электрическим полем, к пробному заряду не зависят от величины пробного заряда, и это отношение называется напряженностью электрического поля в этой точке (точнее, в которую входит пробный заряд).

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = k \frac{Q}{\epsilon r^2} \vec{r} \quad \text{или} \quad \boxed{E = \frac{F}{q} = k \frac{Q}{\epsilon r^2}} \quad (3.1)$$

Напряженность электрического поля является векторной величиной и характеризует электрическое поле с точки зрения силы, с точки зрения эффекта. Направление электрического поля направлено в направлении силы, действующей на положительный пробный заряд.

Единицей измерения напряженности электрического поля является сила, измеряемая в единицах измерения деленного заряда, т. е., измеряется в  $\frac{Н}{Кл}$ .

**Силовые линии электрического поля:**

Силовой линией электрического поля называется такая линия, в каждой точке которой вектор напряженности электрического поля направлен относительно этой линии (рис.3.2).



Рисунок 3.2

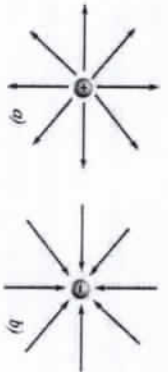


Рисунок 3.3

Силовые линии электрического поля положительного заряда начинаются от поверхности заряда и продолжаются до бесконечности. А отрицательные заряды начинаются в бесконечности и заканчиваются на поверхности заряда (рис. 3.3-а,б). Следовательно, электрическое поле имеет начало и конец, которые являются самими зарядами. Другими словами, оказывается, что источником электрического поля будут сами электрические заряды. Силовые линии электрического поля также можно построить с помощью эксперимента. Для этого в емкость с маслом или маслом кладут измельченную пшеничную крупу или опилки и перемешивают. Когда в смесь

опускают две пластины и дают на них заряд, мы наблюдаем картину на рисунках ниже (рис. 3.4).

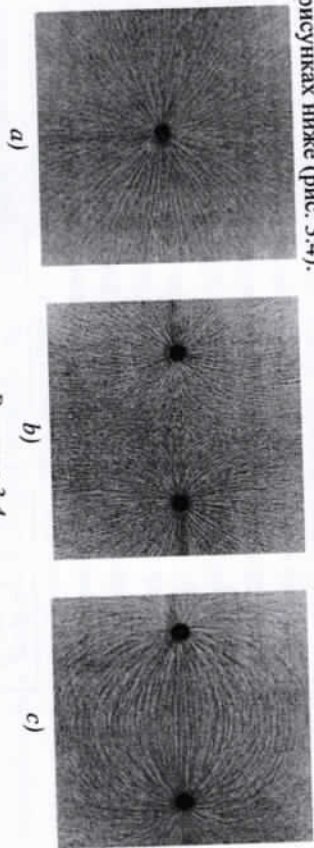


Рисунок 3.4

От последовательного замыкания линий полученного изображения на рисунке 3.4 выше можно получить электрическое поле, которое генерируют вокруг этих зарядов. Полученное таким образом изображение показано на рисунке 3.5.

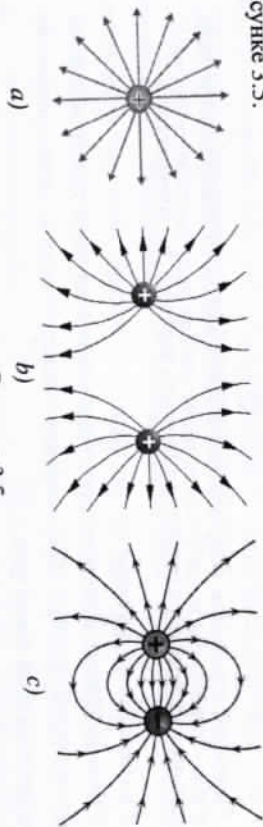


Рисунок 3.5

Проводя опыт, также можно получить изображение электрических полей, образованных несколькими зарядами. Тогда при минимуме пересекание линий на изображении образуются силовые линии электрического поля. На рисунке 3.6 приведено электрическое поле равного количества 4-х зарядов. Такой эксперимент можно провести и с системой заряженных проводников произвольной формы и количества.

#### Принцип суперпозиции:

Чтобы найти напряженность результирующего поля, создаваемого системой зарядов в точке пространства, векторы напряженности поля, создаваемые каждым зарядом в этой точке, складываются геометрически.

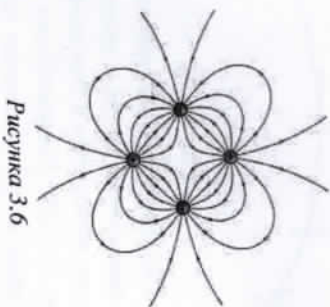


Рисунок 3.6

Такой способ сложения полей называется принципом суперпозиции полей.

$$\vec{E}_{\text{рез}} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n \quad (3.2)$$

Все напряженности поля суммируются, образуя один результирующий вектор напряженности поля, который называется равнодействующим вектором.

При сложении полей складываются и их проекции на оси.

$$\begin{cases} E_x = E_{1x} + E_{2x} + E_{3x} + \dots + E_{nx} \\ E_y = E_{1y} + E_{2y} + E_{3y} + \dots + E_{ny} \\ E_z = E_{1z} + E_{2z} + E_{3z} + \dots + E_{nz} \end{cases} \quad (3.3)$$

Равнодействующие силы связаны с проекциями следующим образом:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (3.4)$$

Ориентировочные косинусы (косинусы угла, образованного осями координат) равнодействующей имеет следующий вид:

$$\cos \alpha = \frac{E_x}{E}, \quad \cos \beta = \frac{E_y}{E}, \quad \cos \gamma = \frac{E_z}{E} \quad (3.5)$$

Например, направления результирующего напряженности поля, образованного в точке, величины которой равны положительным-положительным, положительным-отрицательным и отрицательным-отрицательным зарядам, взятым на равном расстоянии от зарядов А, будут следующими (рис. 3.7):

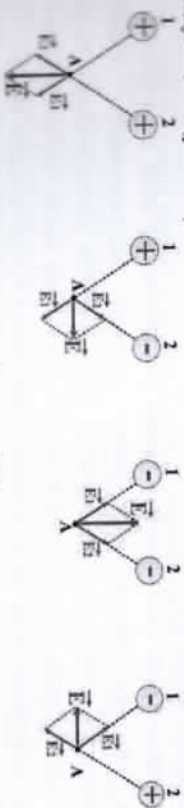


Рисунок 3.7

На рисунке 3.8-а показаны направления результирующего напряженности поля, образованного двумя зарядами, в произвольных точках по правилу параллелограмма. 3.8-б,а на рисунке направления напряжений результирующего поля, образованного двумя зарядами во всех точках, сформированы с помощью программы.



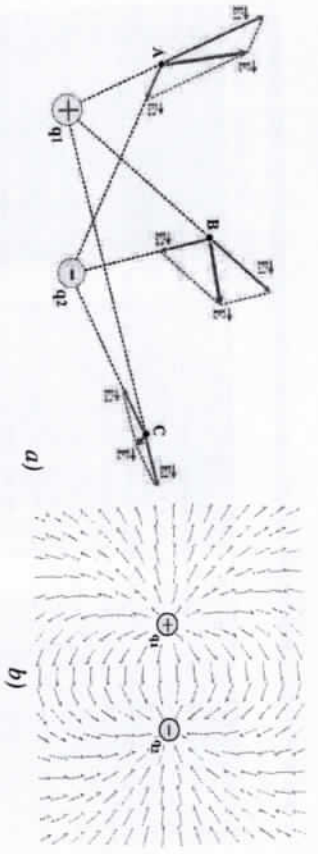


Рисунок 3.8

**Значение напряженности электрического поля:**

Напряженность электрического поля выражает плотность, линий напряженности.

Другими словами, напряженность относится к силовым линиям, проходящим через единицу поверхности, то есть напряженность  $\frac{\Delta V}{\Delta S}$  пропорционально  $\left( E - \frac{\Delta V}{\Delta S} \right)$ .

Так как вблизи заряда линии напряженности плотные, то и значение напряженности в этих точках будет большим, и в этих точках электрическое воздействие будет еще сильнее.

*Если значения напряженности поля во всех точках, взятых из поля простираются, одинаковы, то такое поле называется однородным электрическим полем.*

В однородном поле силовые линии электрического поля параллельны. Если силовые линии расходятся, значение напряженности также уменьшается. Следовательно, значение напряженности электрического поля будет равно, если силовые линии велики в плотном месте, силовые линии малы в разреженном месте и силовые линии равны в параллельном месте.

Напряженность электрического поля означает плотность силовых линий электрического поля, в то время как электрический заряд означает количество общих силовых линий, выходящих из положительно заряженного тела или входящих в отрицательно заряженное тело, то есть  $q \sim \Delta V$ . Предположим, что тело с зарядом  $1 \text{ нКл}$  составляет  $1 \text{ млрд}$ , если представить, что та испускает электрические силовые линии (на самом деле считать, что та испускает электрические силовые линии (на самом деле считать, что та испускает  $3 \text{ нКл}$  составляет  $3 \text{ млрд}$ , и т. д. можно сказать, что тела с зарядом  $3 \text{ нКл}$  составляет  $3 \text{ млрд}$ , и т. д. можно сказать, что электричество испускает силовые линии. Точно так же тело с зарядом  $-1 \text{ нКл}$  составляет  $1 \text{ млрд}$ , если представить, что та поглощает электрические

силовые линии, то тело с зарядом  $-2 \text{ нКл}$  составляет  $2 \text{ млрд}$ , а объект с зарядом  $-3 \text{ нКл}$  составляет  $3 \text{ млрд}$ , и т. д. можно сказать, что электричество поглощает силовые линии.

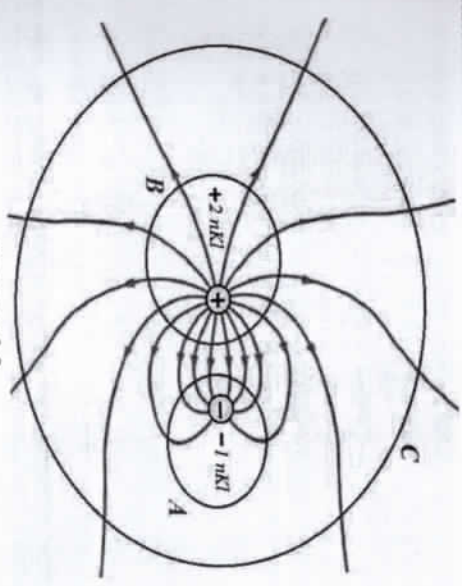


Рисунок 3.9

Когда электрический заряд испускает или поглощает несколько электрических линий, эти электрические силовые линии также проходят через поверхность произвольной формы с меньшим зарядом.

Например, на рисунке 3.9 изображены силовые линии электрического поля системы зарядов с величинами зарядов  $+2 \text{ нКл}$  и  $-1 \text{ нКл}$ . Давайте представим, что  $1 \text{ млрд}$ , силовые линии входят (на самом деле невозможно считать силовые линии) в заряде  $-1 \text{ нКл}$ ,  $2 \text{ млрд}$  силовые линии выходят от заряда  $+2 \text{ нКл}$ .

*+2 нС заряди дампаган В ситдан ширдан 2 млрд. та куч шизифатинг 1 ml. tasi A sitdan o'tib -1 нС зарядида кизди. фолган ула 1 млрд. та куч шизифатинг еса йккала заряди дампаган С ситдан ташрифатга ширф кизди.*

В начале мы предполагали, что тело с зарядом  $1 \text{ нКл}$  излучает  $1 \text{ млрд}$ . электрические силовые линии. До тех пор, пока от поверхности  $C$   $1 \text{ млрд}$ . силовые линии расходятся, то следует сделать вывод, что внутри поверхности  $C$  должно находиться  $1 \text{ нС}$  количество электрического заряда. Действительно, внутри поверхности  $C$  всего имеет

$$q_{\text{внут}} = q_1 + q_2 = 2 \text{ нКл} - 1 \text{ нКл} = 1 \text{ нКл}$$

электрический заряд.

Таким образом, оказывается, что величину электрического заряда можно рисматривать как величину, пропорциональную числу линий электрической

силы, исходящих от поверхности заряженного тела или проникающих на поверхность.

Вопросы по теме:

1. Опишите принципы воздействия на расстоянии и вблизи.
2. Что такое электрическое поле? По какому принципу объясняется электрическое поле?
3. Что такое напряженность электрического поля? Запишите его формулу и единицу измерения.
4. Что понимается под силовыми линиями электрического поля? Приведите пример, нарисовав силовые линии нескольких зарядов.
5. Какая величина напряженности электрического поля? Как складываются электрические поля? Как определяется величина и направление результирующего напряженности поля?
6. Расскажите о значении напряженности электрического поля. С чем можно сравнить величину электрического заряда?

### Решение задачи:

1. Напряженность точечных электрического поля в точке имеет проекции  $E_x=40$  В/м и  $E_y=30$  В/м. Найдите модуль напряженности поля в этой точке (В/М).

- A) 30 В) 40 С) 60 D) 50

Дано: Решение:

$E_x = 40$  В/м  
 $E_y = 30$  В/м

Напряженность электрического поля является векторной величиной. Чтобы определить его величину, воспользуемся сложением векторов:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \sqrt{40^2 + 30^2} = 50 \text{ В/м}$$

Ответ: D) 50.

### § 4. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ЗАРЯЖЕННЫЕ ПРОВОДНИКИ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

#### Нахождение напряжений электрического поля различных тел:

Обычно заряд находится на внешней поверхности проводника, а заряд-по внутреннему объему. Например, если металлический шар заряжен отрицательно, лишние электроны рассеиваются по внешней поверхности шара. Потому что, поскольку металлы являются проводниками, заряд может свободно перемещаться из одного места в другое. Избыток электронов распространяется по поверхности проводника, максимально удаляясь друг от друга. Теперь давайте вычислим формулы для определения напряжений электрического поля различных заряженных тел типа.

Сначала определим напряженность электрического поля внутри заряженной шара или сферы (рис.4.1). Выбрав произвольную точку М из сферы, мы вычтем из этой точки очень маленький элементарный простейший угол  $d\Omega$  в произвольном направлении. Этот простейший угол отделяет поверхность сферы  $dS_1$  и  $dS_2$  элементарные поверхности. Пусть эти поверхности находятся на расстояниях  $r_1$  и  $r_2$  от точки М. При этом поверхности  $dS_1 = d\Omega r_1^2$  и  $dS_2 = d\Omega r_2^2$  будут. Поскольку заряд равномерно распределен по поверхности сферы с поверхностной плотностью  $\sigma$ , элементарные заряды, соответствующие элементарным поверхностям будут:

$$dq_1 = \sigma dS_1 = \sigma d\Omega r_1^2 \text{ и } dq_2 = \sigma dS_2 = \sigma d\Omega r_2^2$$

Это будут элементарные напряженности поля, создаваемые элементарными зарядами.

$$dE_1 = k \frac{dq_1}{r_1^2} = k\sigma d\Omega \text{ и } dE_2 = k \frac{dq_2}{r_2^2} = k\sigma d\Omega$$

Следовательно,  $dE_1 = dE_2$ . Но поскольку их направления противоположны, ( $d\vec{E}_1 = -d\vec{E}_2$ )

результатирующее напряжение в точке М будет:  $d\vec{E} = d\vec{E}_1 + d\vec{E}_2 = 0$ .

Таким образом, оказывается, что напряженность электрического поля внутри заряженной сферы равна нулю.

$$E = 0$$

(4.1)

Расчеты показали, что напряженность электрического поля не только внутри шара или сферы, но и внутри всех заряженных проводников будет равна нулю.

Поверхностно заряженный проводник на поверхности сферы ( $r=R$ ) или напряженность электрического поля на поверхности проводящей сферы будет равна:

$$E_0 = k \frac{Q}{R^2} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (4.2)$$

Диэлектрические тела обладают таким свойством, что в какой бы их точке ни создавался заряд, заряд остается в этом месте длительное время без перемещения. Это связано с отсутствием носителей заряда в диэлектриках.

Даже при заряде сферы из диэлектрического вещества можно получить, что этот заряд равномерно распределяется по всему объему (так как он не может выскочить на поверхность, бегая, как проводники).

силы, исходящих от поверхности заряженного тела или проникающих на поверхность.

Вопросы по теме:

1. Опишите принцип воздействия на расстоянии и вблизи.
2. Что такое электрическое поле? По какому принципу объясняется электрическое поле?
3. Что такое напряженность электрического поля? Запишите его формулу в единичную меру.
4. Что понимается под силовыми линиями электрического поля? Приведите пример, нарисовав силовые линии нескольких зарядов.
5. Какая величина напряженности электрического поля? Как складываются электрические поля? Как определяется величина и направление результирующего напряженности поля?
6. Расскажите о значении напряженности электрического поля. С чем можно сравнить величину электрического заряда?

### Решение задачи:

1. Напряженность точечных электрического поля в точке имеет проекции  $E_x=40$  В/м и  $E_y=30$  В/м. Найдите модуль напряженности поля в этой точке (В/М).

- A) 30 В) 40 С) 60 D) 50

Дано:

$$E_x = 40 \text{ В/м}$$

$$E_y = 30 \text{ В/м}$$

$$E = ?$$

Решение: Напряженность электрического поля является векторной величиной. Чтобы определить его величину, воспользуемся сложением векторов:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

$$E = \sqrt{40^2 + 30^2} = 50 \text{ В/м}$$

Ответ: D) 50.

### § 4. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ЗАРЯЖЕННЫЕ ПРОВОДНИКИ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Нахождение напряжений электрического поля различных тел:

Обычно заряд находится на внешней поверхности проводника, а заряд-по внутреннему объему. Например, если металлический шар заряжен отрицательно, лишние электроны рассеиваются по внешней поверхности шара. Потому что, поскольку металлы являются проводниками, заряд может свободно перемещаться из одного места в другое. Избыток электронов распространяется по поверхности проводника, максимально удаляясь друг от друга. Теперь давайте вычислим формулы для определения напряжений электрического поля различных заряженных тел  $\text{point}$ .

Сначала определим напряженность электрического поля внутри заряженной шара или сферы (рис.4.1). Выбрав произвольную точку М из сферы, мы вычтем из этой точки очень маленький элементарный пространственный угол  $d\Omega$  в произвольном направлении. Этот пространственный угол отделяет поверхность сферы  $dS_1$  и  $dS_2$  элементарные поверхности. Пусть эти поверхности находятся на расстояниях  $r_1$  и  $r_2$  от точки М. При этом поверхности  $dS_1 = d\Omega r_1^2$  и  $dS_2 = d\Omega r_2^2$  будут. Поскольку заряд равномерно распределен по поверхности сферы с поверхностной плотностью  $\sigma$ , элементарные заряды, соответствующие элементарным поверхностям будут:

$$dq_1 = \sigma dS_1 = \sigma d\Omega r_1^2 \text{ и } dq_2 = \sigma dS_2 = \sigma d\Omega r_2^2$$

Это будут элементарные напряженности поля, создаваемые элементарными зарядами.

$$dE_1 = k \frac{dq_1}{r_1^2} = k\sigma d\Omega \text{ и } dE_2 = k \frac{dq_2}{r_2^2} = k\sigma d\Omega$$

Следовательно,  $dE_1 = dE_2$ . Но поскольку их направления противоположны,  $(d\vec{E}_1 = -d\vec{E}_2)$  результирующее напряжение в точке М будет:  $d\vec{E} = d\vec{E}_1 + d\vec{E}_2 = 0$ .

Таким образом, оказывается, что напряженность электрического поля внутри заряженной сферы равна нулю.

$$E = 0$$

(4.1)

Расчеты показали, что напряженность электрического поля не только внутри шара или сферы, но и внутри всех заряженных проводников будет равна нулю.

Поверхностно заряженный проводник на поверхности сферы ( $r=R$ ) или напряженность электрического поля на поверхности проводящей сферы будет равна:

$$E_0 = k \frac{Q}{R^2} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

(4.2)

Диэлектрические тела обладают таким свойством, что в какой бы их точке ни создавался заряд, заряд остается в этом месте длительное время без возбуждения. Это связано с отсутствием носителей заряда в диэлектриках.

Даже при зарядке сферы из диэлектрического вещества можно получить, что этот заряд равномерно распределяется по всему объему (так как он не может выскочить на поверхность, бегая, как проводники).

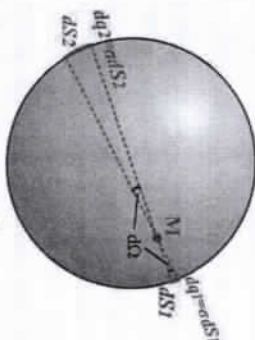


Рисунок 4.1

Выведем формулу, определяющую напряженность поля внутри сферы объемного плоского заряженного шара. Отделим от центра шара сферу произвольного радиуса  $r < R$ .

Объем этой сферы будет:

$$V_r = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi R^3 \left(\frac{r}{R}\right)^3 = V \left(\frac{r}{R}\right)^3$$

А количество заряда, соответствующее этому объему будет равно:

$$q_r = \rho V_r = \rho V \left(\frac{r}{R}\right)^3 = Q \left(\frac{r}{R}\right)^3$$

Напряженность поля, создаваемого  $q_r$  зарядом равна:

$$E_r = k \frac{q_r}{r^2} = k \frac{Q \left(\frac{r}{R}\right)^3}{r^2} = k \frac{Qr}{R^3} = E_0 \frac{r}{R}$$

Таким образом, если заряд равномерно распределен по всему объему сферы, то значение напряженности электрического поля линейно возрастает от центра сферы к ее поверхности, а напряженность электрического поля на произвольном расстоянии  $r < R$  от центра объемно заряженной сферы будет равна:

$$E = k \frac{Q}{R^3} r = E_0 \frac{r}{R} \quad (4.3)$$

Здесь:  $E_0 = k \frac{Q}{R^3}$  — напряженность поля на поверхности сферы.

Вычислим напряженность поля на поверхности объемно заряженного шара. Из этой формулы следует, что если принять во внимание формулу суммарной плотности.

$$E_0 = k \frac{Q}{R^2} = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0 R^2} = \frac{\rho V}{4\pi \epsilon_0 R^2} = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3}{4\pi \epsilon_0 R^2} = \frac{\rho R}{3\epsilon_0}$$

Следовательно, напряженность поля ( $r=R$ ) на поверхности объемно заряженного шара будет равна:

$$E_0 = k \frac{Q}{R^2} = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0 R^2} = \frac{\rho R}{3\epsilon_0} \quad (4.4)$$

Независимо от того, является ли сфера объемно или поверхностно заряженной, в точках вне сферы ( $r > R$ ) создаваемые ими напряженности электрического поля одинаковы.

Значение напряженности поля будет таким же, как и значение, когда весь заряд сферы сосредоточен в одной точке в центре сферы. Напряженность поля вне сферы будет:

$$E = k \frac{Q}{\epsilon r^2} = \frac{Q}{4\pi \epsilon \epsilon_0 r^2} \quad (4.5)$$

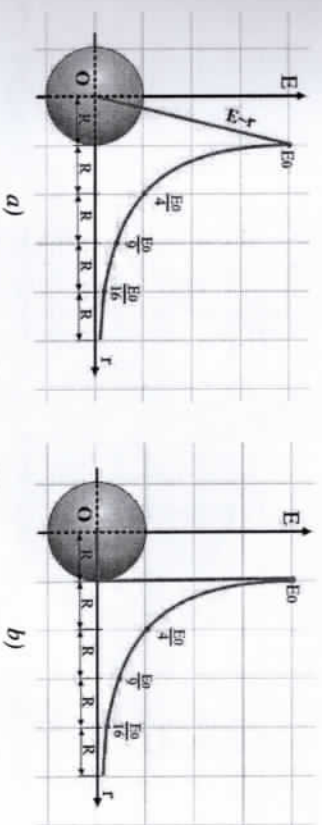


Рисунок 4.2

На приведенных выше рисунках изображен график зависимости напряженности электрического поля, создаваемого объемными и поверхностно заряженными шарами, от расстояния.

Теперь давайте вычислим поле бесконечно длинной заряженной нити. Так как заряженная нить бесконечно длинная, то какую бы точку нити мы ни взяли, правая и левая части этой точки будут взаимно симметричны. Возьмем начало системы координат в произвольной точке  $O$  нити и расположим ось  $Ox$  вдоль нити, а ось  $Oy$  перпендикулярно нити. Выделим элементарную длину  $dx$  в точке  $A$  на произвольном расстоянии  $x$  от начала координат (рис.4.3). Заряд этой элементарной длины будет  $dq = \tau dx$  и элементарным напряжением поля в точке  $M$ . Проекция этих элементарных напряжений поля на оси будут равны  $dE_x = dE \cos \varphi$  и  $dE_y = dE \sin \varphi$ .

Но проекция элементарного напряженности поля, образованного в точке  $M$  элементарным сечением, полученным в другой точке  $v$ , симметричной точке  $A$ , на ось  $Ox$  будет такой же величиной  $dE_x = dE \cos \varphi$ , как и в точке  $A$ , и направлена в противоположных направлениях. Следовательно, результирующее напряжение поля складывается из суммы  $dE_x$ , так направление результирующего напряжения остается перпендикулярным нити, т. е.  $\vec{E} = \int d\vec{E}_y$  будет при этом:

$$dE_y = dE \sin \varphi = k \tau \frac{dx}{r^2} \cdot \frac{d}{r} = \frac{\tau d}{4\pi \epsilon \epsilon_0 r^3} \cdot \frac{dx}{r} \cdot \frac{d}{r} = \frac{\tau d}{4\pi \epsilon \epsilon_0 (x^2 + d^2)^{3/2}}$$

от  $-\infty$  до  $+\infty$  интегрируя, находим значение результирующего напряжения поля на расстоянии  $d$  от нити. На этом мы и получим результат.

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\tau d}{4\pi \epsilon \epsilon_0 (x^2 + d^2)^{3/2}} dx = \frac{\tau d}{4\pi \epsilon \epsilon_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{(x^2 + d^2)^{3/2}} = \frac{\tau d}{4\pi \epsilon \epsilon_0} \cdot \frac{1}{d^2} \cdot \frac{x}{\sqrt{x^2 + d^2}} \Big|_{-\infty}^{+\infty} = \frac{\tau}{2\pi \epsilon \epsilon_0 d} \cdot (1 + 1) = \frac{\tau}{2\pi \epsilon \epsilon_0 d}$$

$$dE = k \frac{dq}{\epsilon r^2} = k \tau \frac{dx}{\epsilon r^2}$$

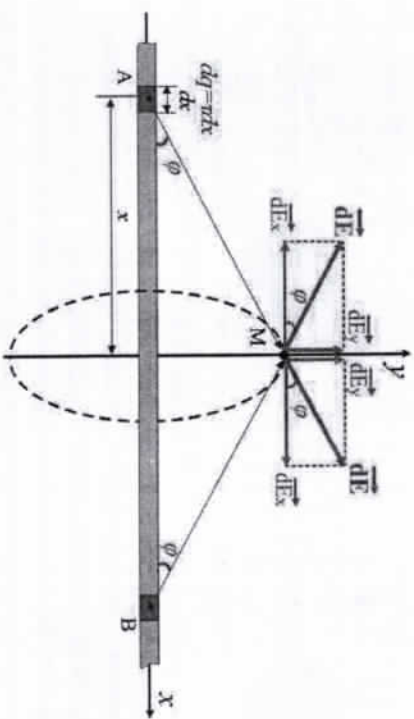


Рисунок 4.3

Таким образом, напряженность электрического поля в точке, лежащей на расстоянии d от заряженной бесконечно длинной нити или провода, будет равна (рис. 4.3):

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 d} \quad (4.6)$$

Теперь вычислим электрическое поле равномерно заряженной бесконечной пластины (рис.4.4). Изобразим плоскую заряженную бесконечную пластину в виде прямоугольника шириной a и высотой b, бесконечно длинной. Эти две части взаимно симметричны, если из произвольного положения плоскости разделить ось на две. Поэтому произвольную головку располагаем в центре прямоугольного треугольника, как показано на рисунке 4.4.

Отделим элементарную поверхность (полосу) шириной dx и высотой b, проходящую через точку A, лежащую на произвольном расстоянии x от начала координат. Элементарная поверхность этой полосы равна dS=bdx, а элементарный заряд равен dq=σdS=σb dx, в то время как значение напряженности элементарного поля в точке M, взятой на оси Oy, равно:

$$dE = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 r} = \frac{dq}{2\pi\epsilon_0 b r} = \frac{\sigma b dx}{2\pi\epsilon_0 b r} = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{dx}{r}$$

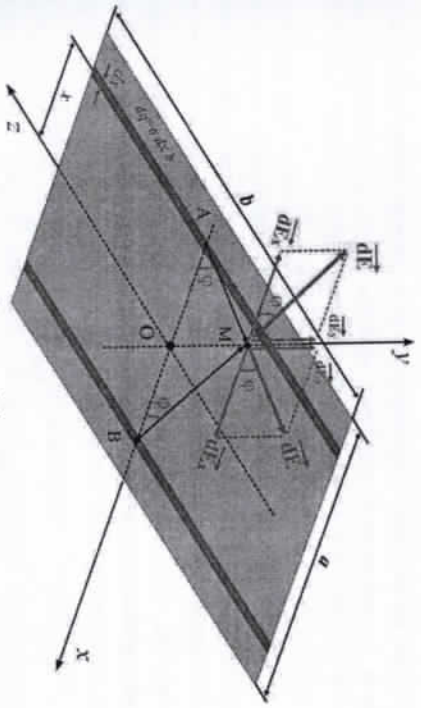


Рисунок 4.4

Проекции этих элементарных напряжений поля на оси будут равны:

$$dE_x = dE \cos \varphi \quad \text{и} \quad dE_y = dE \sin \varphi$$

Но проекция элементарного напряженности поля, образованного в точке A элементарной полосой, полученной в другой точке B, симметричной точке M, на ось Ox такая же, как и в точке A dE<sub>x</sub> = dE cos φ, которая количественно равна и направлена в противоположных направлениях.

Следовательно, результирующее напряжение поля складывается из суммы dE<sub>y</sub>, так что направление результирующего напряжения остается перпендикулярным плоскости, т. е.

$$\vec{E} = \int d\vec{E} = \int dE_y \vec{e}_y$$

$$dE_y = dE \sin \varphi = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{dx}{r} \cdot \frac{d}{r} = \frac{\sigma d}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{dx}{r^2}$$

Интегрируя это выражение от -∞ до +∞, находят значение результирующего напряжения поля на расстоянии d от плоскости, которое будет:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma d}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{dx}{r^2} = \frac{\sigma d}{2\pi\epsilon_0} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{(x^2 + d^2)^{3/2}} = \frac{\sigma d}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{d} \cdot \arctg\left(\frac{x}{d}\right) \Big|_{-\infty}^{+\infty} = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0} \cdot (\arctg(+\infty) - \arctg(-\infty)) = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \left(-\frac{\pi}{2}\right)\right) = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

Таким образом, оказывается, что напряженность электрического поля равномерно заряженной бесконечной пластины будет равна (рис. 4.4):

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad (4.7)$$

Вычислим, каким будет электрическое поле между двумя параллельными пластинами с одинаковым плоским зарядом с противоположными знаками (рис. 5.5).

При этом каждая из пластин  $E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}$  образует поле. Вне пластин эти

поля полностью поглощают друг друга, так как направлены в противоположные стороны. А между пластинами, так как они являются направленными, они усиливают друг друга, и результирующее значение напряжения равно сумме напряжений, создаваемых положительной и отрицательной пластинами, т. е. будет.

$$E = E_+ + E_- = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0} + \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}$$

Следовательно, напряженность электрического поля между двумя параллельными пластинами с одинаковым зарядом с противоположным знаком будет равна:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0} \quad (4.8)$$

Если одна из пластин положительно заряжена поверхностной плотностью  $\sigma_1$ , а другая отрицательно заряжена поверхностной плотностью  $\sigma_2$ , то напряженность поля между пластинами равна:

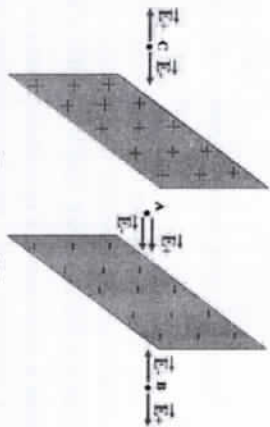
$$E = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2\epsilon\epsilon_0} \quad (4.9)$$

а за пределами пластин напряженность поля имеет вид:

$$E = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2\epsilon\epsilon_0} \quad (4.9a)$$

Приведем теперь формулу расчета напряженности электрического поля в произвольной точке оси заряженного кольца (рис. 4.6). К центру кольца с прямолинейно заряженным радиусом R распологаем систему координат, как показано на рисунке.

Вычтем из произвольной точки A кольца элементарную дугу длиной dl. Элементарный заряд элементарной дуги равен  $dq = \tau dl$ , этот заряд создаст элементарное поле, равное в произвольной точке M, взятой на расстоянии L от оси кольца.



Рисуника 4.5

$$dE = k \frac{dq}{r^2} = k \tau \frac{dl}{r^2}$$

$$dE_x = dE \cos \varphi \quad \text{и} \quad dE_y = dE \sin \varphi$$

Проекция этих элементарных напряжений поля на ось будут равны. Но проекция элементарного напряженности поля, образованного в точке M элементарной полосой, полученной в другой точке B, симметричной точке A, на ось Oy равна и направлена в противоположном направлении, как и в точке A на величину  $dE_y = dE \sin \varphi$ .

Следовательно, результирующее напряженности поля складывается из суммы  $dE_x$ , так что направление результирующего напряженности в точке M остается перпендикулярным плоскости кольца, т. е.  $\vec{E} = \int d\vec{E}_x$ . При этом, интегрируя от 0 до  $2\pi R$ , находим значение результирующего напряженности поля в точке M.

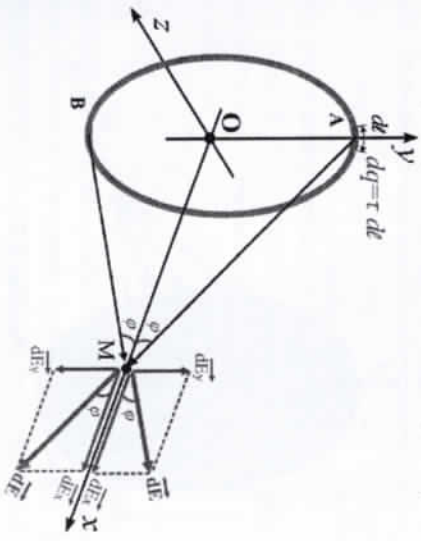
$$dE_x = dE \cos \varphi = k \tau \frac{dl}{r^2} \cdot \frac{L}{r} = \frac{k \tau L}{r^3} \cdot dl$$

В результате образуется это выражение:

$$E = \int dE_x = \frac{k \tau L}{\epsilon r^3} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{k \tau L}{\epsilon r^3} (2\pi R - 0) = k \tau 2\pi R \cdot \frac{L}{\epsilon r^3} = \frac{k Q}{\epsilon} \cdot \frac{L}{(R^2 + L^2)^{3/2}}$$

Это также можно выражено следующим виде.

$$E = k \frac{Q}{\epsilon} \cdot \frac{L}{(R^2 + L^2)^{3/2}} = \tau \cdot 2\pi R \cdot \frac{L}{\epsilon r^3} = \frac{\tau R}{2\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{L}{(R^2 + L^2)^{3/2}}$$



Рисуника 4.6

Таким образом, напряженности равномерно заряженного электрического поля в точке, лежащей на расстоянии L от центра кольца радиусом r зарядом, будет равна (рис. 4.6):

$$E = \frac{\tau R}{2\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{L}{(R^2 + L^2)^{3/2}} = k \frac{Q}{\epsilon} \cdot \frac{L}{(R^2 + L^2)^{3/2}} \quad (4.10)$$

Теперь давайте определим, в какой точке оси кольца электрическое поле, образуемое это заряженное кольцо, будет наибольшим. Для этого построим функцию зависимости напряженности электрического поля  $L$  от  $E=E(L)$ . Производная этой функции по переменной  $L$  достигает своего экстремального значения, когда  $E'(L) = 0$ .

$$E'(L) = \frac{\tau R}{2\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{1 \cdot (R^2 + L^2)^{-3/2} - L \cdot 3/2 \cdot (R^2 + L^2)^{-5/2} \cdot 2L}{(R^2 + L^2)^3} = 0, \rightarrow$$

$$\rightarrow (R^2 + L^2)^{3/2} - 3L^2(R^2 + L^2)^{1/2} = 0, \rightarrow (R^2 + L^2)^{1/2} \cdot (R^2 + L^2 - 3L^2) = 0.$$

При этом  $L_0 = 2R$ , при напряженности электрического поля достигает своего максимального значения.

$$E_{\max} = E(\sqrt{2}R) = \frac{\tau R}{2\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{\sqrt{2}R}{(R^2 + 2R^2)^{3/2}} = \frac{\sqrt{6}\tau}{18\epsilon\epsilon_0 R} = \frac{\sqrt{6}}{9\epsilon} k \frac{Q}{R^2}$$

Следовательно, наибольшее значение напряженности, которое будет иметь на кольцевой оси от центра кольца с равномерно заряженным радиусом  $R$ , - это  $E_{\max}$ , а расстояние от этой точки до центра кольца  $L_0$  будет следующим:

$$E_{\max} = \frac{\sqrt{6}\tau}{18\epsilon\epsilon_0 R} = \frac{\sqrt{6}}{9\epsilon} k \frac{Q}{R^2}, \quad L_0 = \sqrt{2}R \quad (4.11)$$

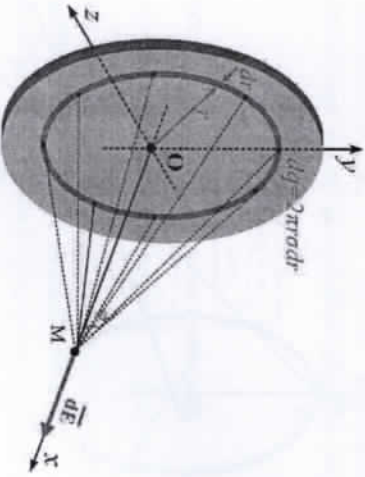


Рисунок 4.7

Выведем формулу для определения напряженности поля в произвольной точке на оси плоского заряженного диска. Отделим от диска  $dr$  кольцо произвольного радиуса  $r$  ( $r \leq R$ ) произвольной толщины.

Будучи элементарным зарядом кольца  $dq = 2\pi r\sigma dr$ , элементарное напряженности поля в точке  $M$ , взятое из оси кольца, будет равно.

$$dE = k \frac{dq}{\epsilon} \cdot \frac{L}{(r^2 + L^2)^{3/2}} = \frac{2\pi r\sigma dr}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{L}{(r^2 + L^2)^{3/2}} = \frac{\sigma L}{2\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{r dr}{(r^2 + L^2)^{3/2}}$$

Интегрируя выражения с 0 до  $R$ , мы найдем напряженности диска в данной точке.

$$E = \int dE = \frac{\sigma L}{2\epsilon\epsilon_0} \cdot \int_0^R \frac{r dr}{(r^2 + L^2)^{3/2}} = \frac{\sigma L}{2\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{r^2 + L^2}} \Big|_0^R = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0} \left( 1 - \frac{L}{\sqrt{R^2 + L^2}} \right)$$

Следовательно, напряженность электрического поля в точке, лежащей на расстоянии  $L$  от центра плоского заряженного диска радиусом  $R$ , будет равна (рис. 4.7):

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0} \cdot \left( 1 - \frac{L}{\sqrt{R^2 + L^2}} \right) \quad (4.12)$$

**Электрический заряд в электрическом поле:**

Рассмотрим некоторые случаи, связанные с электрическим зарядом в электрическом поле. Одним из них является вопрос о заряженной частице, находящей неподвижно в электрическом и гравитационном полях (рис. 4.8).

Капля заряда массой  $m$  находится в покое под действием силы тяжести  $F_{ог} = mg$ , направленной к центру Земли, и кулоновских сил электрического поля  $F_{э} = qE$ , направленных вверх. Эти силы равны по величине и направлены в противоположные стороны. Из этого следует.

$$F_{ог} = F_{э}, \rightarrow mg = qE, \rightarrow E = \frac{mg}{q}$$

Следовательно, если в электрическом поле находится капля с массой  $m$  и зарядом  $q$ , значение напряженности электрического поля будет следующим (рис. 4.8).

$$E = \frac{mg}{q} \quad (4.13)$$

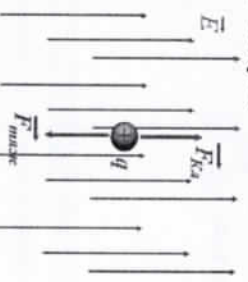


Рисунок 4.8

Теперь определим, под каким углом от вертикали при введении в электрическое поле висящего на нитке шарика с зарядом открывается (рис. 4.9). Шар, подвешенный на нитке массой  $m$ , остается в покое под действием силы тяжести  $F_{ог} = mg$ , направленной к центру Земли, кулоновской силы  $F_{э} = qE$  горизонтально направленного электрического поля и сил натяжения нити  $T$ . Это треугольник сил замкнутая. Из прямоугольного треугольника можно найти:

$$1g\alpha = \frac{F_{\text{max}}}{F_{\text{св}}} = \frac{mg}{qE}$$

Следовательно, если шар, подвешенный на нити массой  $m$ , ввести в однородное поле с горизонтально направленным напряжением  $E$ , угол раскрытия нити от вертикали  $\alpha$  будет равен:

$$1g\alpha = \frac{mg}{qE} \quad (4.14)$$

Теперь рассмотрим движение

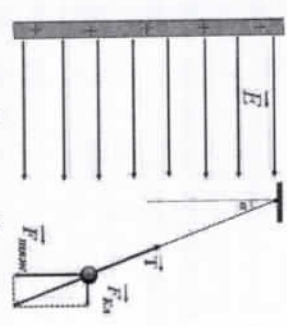


Рисунок 4.9

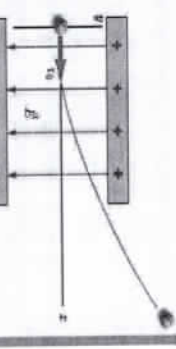


Рисунок 4.10

заряженной частицы, летящей в однородное электрическое поле (рис. 4.10). На рисунке изображено, как электрон летит вертикально в электрическое поле между параллельными пластинами. В этом мы проверим, каково уравнение движения и траектория электрона.

На электрон действует сила  $F_y = eE$ . Направленная вдоль оси  $Oy$ , которая дает ему ускорение вдоль оси  $Oy$   $a_y = \frac{eE}{m_e}$ .

$$\begin{cases} g_x = g_0 = \text{const} \\ g_y = a_y = \frac{eE}{m_e} \end{cases} \quad (4.15)$$

А по оси  $Ox$  электрон движется равномерно, так как на него не действует сила. Тогда уравнения скоростей на координатных осях электрона будут иметь вид.

$$\begin{cases} x = g_0 t = g_0 t^2 \\ y = \frac{a_y t^2}{2} = \frac{eE}{2m_e} t^2 \end{cases} \quad (4.16)$$

Уравнения движения электрона, однако, будут иметь вид. Из этого следует уравнение траектории электрона, если  $t = \frac{x}{g_0}$  подставить подстановку в уравнение 2 системы.

$$y = \frac{eE}{2m_e g_0^2} x^2 \quad (4.17)$$

И это напоминает нам известное из математики уравнение параболы  $y = ax^2$ . Следовательно, траектория заряженной частицы, летящей вертикально в электрическое поле, как на рисунке 4.10, будет состоять из параболы.

Если на рисунке 4.10 что длина параллельных пластин равна  $l$ , то электрон будет перемещаться на расстояние вдоль оси  $Oy$ , пока не окажется между пластинами.

$$\Delta y = \frac{eE}{2m_e g_0^2} l^2 \quad (4.18)$$

Частные случаи для двух зарядных полей:

Если  $q_1$  и  $q_2$  заряды имеют одинаковый знак, то на линии, соединяющей эти заряды, и между зарядами существует такая точка, что результирующее напряжение поля в этой точке равно нулю. Это означает, что точечный модуль будет находиться вдали от большего заряда, а модуль будет находиться рядом с малым зарядом. Определим расстояние этой точки от зарядов. В точке, где результирующее напряжение поля равно нулю, напряжения поля, создаваемые каждым зарядом, будут количественно равны и направлены в противоположные стороны, т. е. будут.

$$\begin{cases} E_2 = -E_1 \\ E_2 = E_1 \end{cases}$$

Кроме того

$$k \frac{|q_1|}{x_1^2} = k \frac{|q_2|}{x_2^2}, \rightarrow x_2 = \sqrt{\frac{|q_2|}{|q_1|}} \cdot x_1, \rightarrow r - x_1 = \sqrt{\frac{|q_2|}{|q_1|}} \cdot x_1, \rightarrow x_1 = \frac{\sqrt{|q_1|}}{\sqrt{|q_1|} + \sqrt{|q_2|}} \cdot r$$

из этого следует, что:

$$x_2 = r - x_1 = \frac{\sqrt{|q_2|}}{\sqrt{|q_1|} + \sqrt{|q_2|}} \cdot r$$

Таким образом, в точке, где результирующее напряжение поля равно нулю, расстояние от заряда 1 равно  $x_1$ , а расстояние от заряда 2 равно  $x_2$ , получается ( $r$  – расстояние между зарядами) (рис. 4.11):

$$\begin{cases} x_1 = \frac{\sqrt{|q_1|}}{\sqrt{|q_1|} + \sqrt{|q_2|}} \cdot r \\ x_2 = \frac{\sqrt{|q_2|}}{\sqrt{|q_1|} + \sqrt{|q_2|}} \cdot r \end{cases} \quad (4.19)$$

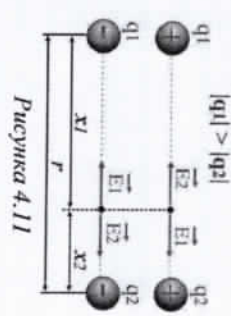


Рисунок 4.11



Если заряды  $q_1$  и  $q_2$  имеют разноименные знаки, то на линии, соединяющей эти заряды, и вне зарядов находится такая точка, что результирующее напряжение поля в этой точке равно нулю.

Это означает, что точечный модуль будет находиться вдали от большого заряда, а рядом с малым зарядом. Определим расстояние этой точки от зарядов. В точке, где результирующее напряжение поля равно нулю, напряжения поля, создаваемые каждым зарядом, будут количественно равны и направлены в противоположные стороны, т. е. будут:

$$\begin{cases} E_2 = -E_1 \\ E_2 = E_1 \end{cases}$$

Из этого

$$k \frac{|q_1|}{y_1^2} = k \frac{|q_2|}{y_2^2} \rightarrow y_2 = \sqrt{\frac{|q_2|}{|q_1|}} \cdot y_1 \rightarrow y_1 = \sqrt{\frac{|q_1|}{|q_2|}} \cdot r$$

и получается:

$$y_2 = y_1 - r = \frac{\sqrt{|q_2|}}{\sqrt{|q_1|} - \sqrt{|q_2|}} \cdot r$$

Таким образом, в точке, где результирующее напряжение поля равно нулю, расстояние от заряда 1 равно  $y_1$ , а расстояние от заряда 2 равно  $y_2$ , получается ( $r$  - расстояние между зарядами) (рис. 4.12):

$$\begin{cases} y_1 = \frac{\sqrt{|q_1|}}{\sqrt{|q_1|} - \sqrt{|q_2|}} \cdot r \\ y_2 = \frac{\sqrt{|q_2|}}{\sqrt{|q_1|} - \sqrt{|q_2|}} \cdot r \end{cases}$$

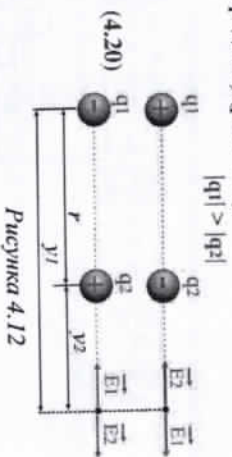


Рисунок 4.12

Вопросы по теме:

1. Докажите, что напряженность электрического поля внутри проводящей сферы и сферы равна нулю.
2. Напишите формулу напряженности электрического поля бесконечно длинной заряженной нити. Приведите формулу, если это возможно.
3. Напишите формулу напряженности электрического поля бесконечно длинной заряженной пластины. Приведите формулу, если это возможно.
4. Напишите формулу напряженности электрического поля между бесконечными параллельными пластинами, заряженными противоположными токами. Приведите формулу, если это возможно.
5. Напишите формулу напряженности электрического поля заряженного конца. Приведите формулу, если это возможно.

6. Напишите формулу напряженности электрического поля заряженного диска.
7. Напишите условие сохранения энергии в электрическом и гравитационном полях заряженной частицы.
8. Определите угол раскрытия нити от вертикали, когда шарик, висящий на нити, вводиться в электрическое поле.
9. Напишите уравнения скорости, движения и траектории заряженной частицы, летящей вертикально в однородном электрическом поле. Какова траектория заряженной частицы?

Решение задач:

1. В однородном горизонтальном электрическом поле на нитке висит шарик массой  $10 \text{ г}$  с зарядом  $200 \text{ нКл}$ . Нитка составляет угол  $45^\circ$  с вертикалью. Найти напряженность электрического поля (В/м).

- A)  $5 \cdot 10^5$  В)  $10^5$  С)  $5 \cdot 10^4$  Д)  $5 \cdot 10^5$

Дано:

Решение:

$$m = 10^{-2} \text{ кг}$$

Как мы видели по теме изучения закона Кулона:

$$q = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$$

$$\tan \alpha = \frac{F_k}{mg} = \frac{Eq}{mg}, \rightarrow E = \frac{mg \cdot \tan \alpha}{q}$$

$$\alpha = 45^\circ$$

$$E = \frac{mg \cdot \tan \alpha}{q} = \frac{10^{-2} \cdot 10 \cdot 1}{2 \cdot 10^{-7}} = 5 \cdot 10^5 \text{ В/м}$$

Ответ: Д)  $5 \cdot 10^5$ .

2. Сфера с радиусом  $1 \text{ м}$  и зарядом  $2 \text{ нКл}$  находится в среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Каково напряжение электрического поля в точке, удаленной на  $1 \text{ м}$  от поверхности сферы (В/м).

Дано:

Решение:

$$r = 1 \text{ м}$$

Используем следующую формулу:

$$\epsilon = 2$$

$$q = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$E = k \frac{q}{\epsilon (r + l)^2}$$

$$l = 1 \text{ м}$$

$$E = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-9}}{2(1+1)^2} = 2,25 \text{ В/м}$$

Ответ: 2,25 В/м.



## § 5. ПРОВОДНИК И ДИЭЛЕКТРИК, ВВОДИМЫЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Изучение электрического поля на заряды мы изучали выше. Теперь рассмотрим по отдельности, какое явление возникает при введении в электрическое поле проводника и диэлектрика.

*Проводник, введенный в электрическое поле:*

Проводниками называют вещества, обладающие способностью хорошо проводить электрический ток. Электроны, расположенные на самом внешнем слое молекул и атомов, из которых состоит проводник, очень слабо связаны с ядром, что означает, что эти электроны подвергаются почти небольшому внешнему воздействию (тепло, свет, электрический ток и т. д.), который также становится свободным электроном и свободно перемещается по всему объему кристалла в пространстве между молекулой и атомами.

В обычных условиях все металлы (медь, алюминий, вольфрам, железо, хром и др.) считаются проводниками. В проводниках заряд без труда может свободно перемещаться из одного места тела в другое. Это связано с наличием свободных электронов, которые несут заряд. Число свободных электронов в единице объема называется концентрацией свободных электронов. В проводниках свободные электроны находятся в диапазоне концентраций  $n = 10^{25} - 10^{29} \text{ м}^{-3}$ . Введем в электрическое поле металлическую пластину (рис.5.1-а). Внешнее электрическое поле действует на все связанные и свободные заряды внутри проводника. Поскольку связанные заряды (атом, потерявший электрон и ставший положительным ионом) образуют в узлах кристаллической решетки сплошные ячейки, то под действием электрического поля эти заряды не могут возбуждаться (на рисунке связанные заряды не изображены).

А свободные заряды под действием внешнего электрического поля свободно перемещаются из одного места проводника в другое. На рисунке показано, что электроны движутся влево, двигаясь против линий напряжения. На левой стороне пластины проводника изображено, что лишние электроны накапливаются и становятся отрицательно заряженными, а на правой стороне возникает дефицит электронов и становится положительно заряженным (рис.5.1-б).

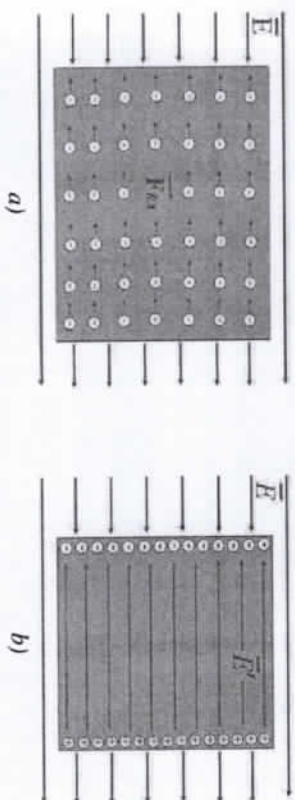


Рисунок 5.1

*Несение, при котором внутри проводника, введенного в электрическое поле, электрические заряды расходятся и собираются на противоположной стороне проводника, называется явлением индуцированной индукции.*

Чем сильнее внешнее электрическое поле, тем сильнее ощущается явление электростатической индукции, то есть, чем больше зарядов скапливается на противоположных сторонах. В результате явления электростатической индукции внутри проводника, кроме внешнего поля, возникает вторичное поле  $E'$  (рис.5.1 б).

Расчеты показывают, что площадь  $E'$  равна по величине площади  $E$  и направлена в противоположную сторону, т. е.  $\vec{E}' = -\vec{E}$ . Следовательно,

внутри проводника, введенного в электрическое поле, будет результирующее поле  $E_{\text{рез}} = \vec{E} + \vec{E}' = \vec{E} - \vec{E} = 0$ . Иными словами, электрическое поле не проникает внутрь проводника (рис. 5.2)

С помощью явления электростатической индукции можно разделить проводник, введенный в поле, на два и получить соответственно равные и противоположные направленные заряды (рис:55.3-а). При разделении проводника, введенного в электрическое поле на три и более участка можно получить только на двух крайних участках количество равные и противоположно направленные заряды, при этом средние участки остаются нейтральными (рис:5.3-б).

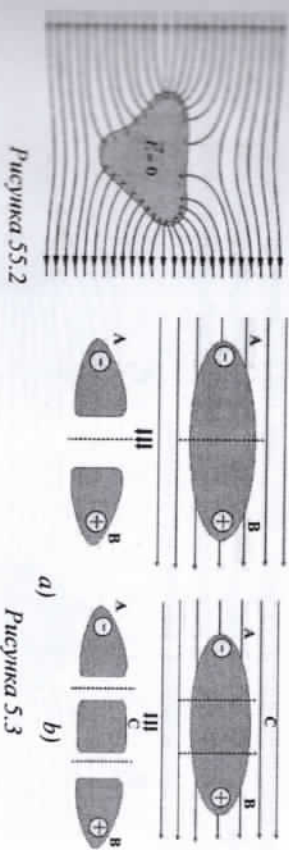


Рисунок 55.2

Рисунок 5.3

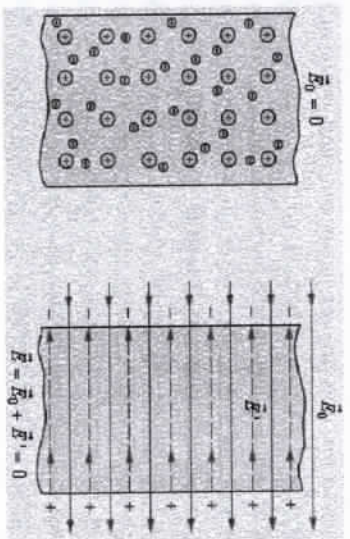


Рисунок 5.4

Электрическое поле в проводнике можно изобразить так же, как на рисунке 5.4, для случая, когда оно включено и не включено во внешнее электрическое поле. Так как результирующее поле внутри проводника равно нулю, то свойства электрического поля изменяются во внешней окрестности этого проводника. Внешнее однородное электрическое поле теряет однородность во внешнем ближайшем окружении проводника.

Другими словами, проводник хотя и не заряжен, внешне электрическое поле деформируется из-за явления электростатической индукции. На рисунке 5.2 эта же ситуация наглядно иллюстрируется для проводника произвольной формы. На рис.5.3 приведены интегрированная проводящая сфера и поля проводящая сфера, введенные в однородное электрическое поле, в которых явление электростатической индукции наблюдается одинаково. Другими словами, оказывается, что оба проводника деформируют внешнее электрическое поле одинаково. В обоих случаях электрическое поле не может существовать внутри проводника.

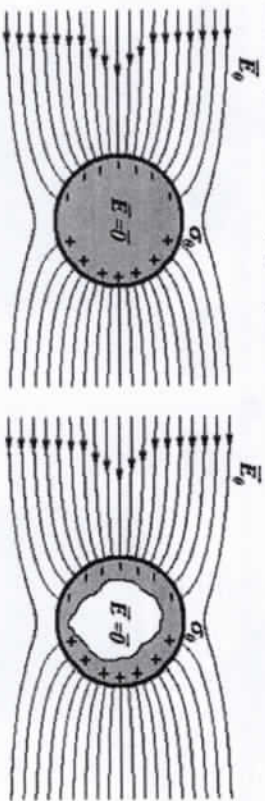


Рисунок 5.5

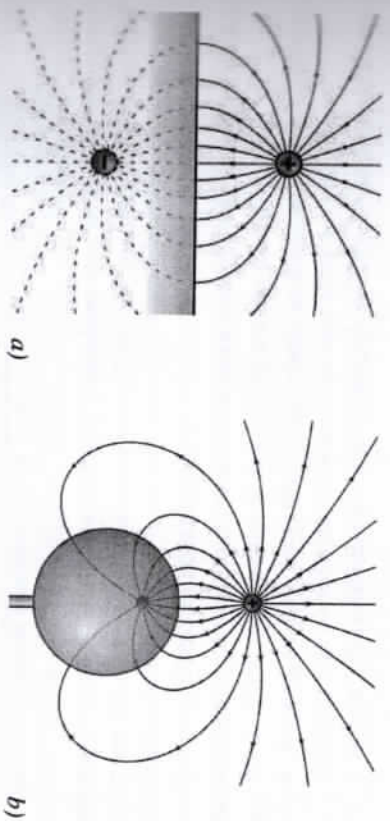


Рисунок 5.6

Теперь давайте проверим, какое явление возникает в проводниках, введенных в электрическое поле точечного заряда. На рисунке 5.6-а изображен точечный заряд и электрическое поле, вблизи которого незаряженный проводник образует плоскость. При этом образовалось такое же поле, как и при симметричном внутри плоскости заряде с тем же числом, но противоположным знаком. На рисунке 5.6-б, изображено электрическое поле, когда эта незаряженная плоскость заменяется незаряженной сферой, присоединенной к Земле.

На рисунке 5.7 изображено электрическое поле без заземления проводника на рисунке 5.6-б. На рисунке 5.8 показано явление электростатической индукции в проводниках произвольной формы, введенных в электрическое поле точечного заряда, и деформация электрического поля вблизи этих проводников.

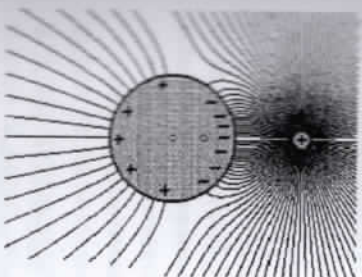


Рисунок 5.7

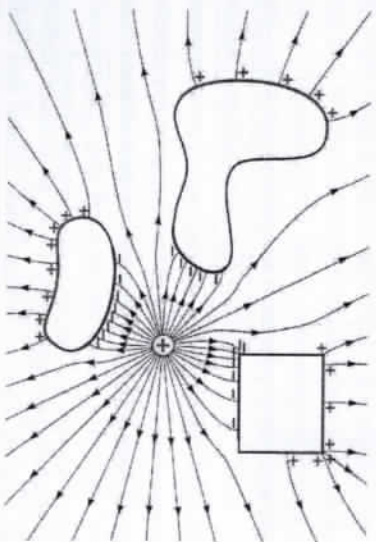


Рисунок 5.8

Из всех приведенных выше изображений можно сделать вывод, что:

- в любом случае внешнее поле не проникает внутрь проводника, что означает, что проводник сжимает электрическое поле снаружи;
- в любом случае электрический заряд начинается с поверхности проводника или заканчивается на этой поверхности;
- в любом случае линии напряженности электрического поля будут перпендикулярны проводнику.

*Электрический диполь:*

Система зарядов, находящихся на некотором расстоянии  $\ell$  друг от друга и имеющих заряды  $+q$  и  $-q$ , называется электрическим диполем. Векторная величина, равная произведению заряда диполя на расстояние между зарядами, называется электрическим моментом диполя.

$$\vec{p}_e = q \cdot \vec{\ell} \quad (5.1)$$

Единица измерения электрического момента  $[Кл \cdot м]$ . За направление электрического момента принято направление от отрицательного заряда к положительному (рис. 5.9).

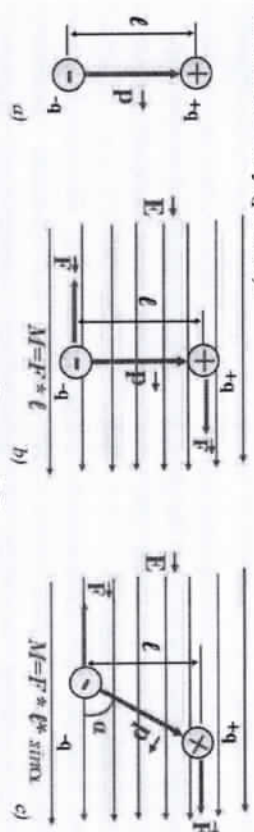


Рисунок 5.9

При введении электрического диполя во внешнее электрическое поле возникает момент двойной силы, которая стремится повернуть диполь вокруг его центра тяжести. Значение момента этой пары сил является наибольшим, когда направление электрического момента перпендикулярно направлению внешнего электрического поля, и нулевым, когда они параллельны. В общем случае величина крутящего момента будет равна (рис. 5.9):

$$M = F \cdot d = q E \ell \sin \varphi = p_e E \sin \varphi \quad (5.2)$$

Где:  $\varphi$  – угол между напряженностью электрического поля и векторами электрического момента. Вектор крутящего момента, действуя электрическим полем на электрический диполь, будет иметь вид:

$$\vec{M} = \vec{p}_e \times \vec{E} \quad (5.3)$$

Внешнее электрическое поле выполняет работу, поворачивая диполь в свою сторону. Работа, выполняемая полем при повороте находящегося диполя к направлению электрического поля в перпендикулярно

Итак, выполненная работа будет выглядеть следующим образом:

$$A = p E \quad (5.4)$$

Поскольку электрический диполь взаимодействует с электрическим полем, этот эффект будет иметь энергию, то есть потенциальную энергию. Потенциальная энергия электрического диполя в электрическом поле имеет вид:

$$W_p = -p E \cos \alpha \quad (5.5)$$

На рисунке 5.10 ниже изображено поле электрического диполя и поле, образуемое при введении этого диполя во внешнее электрическое поле.

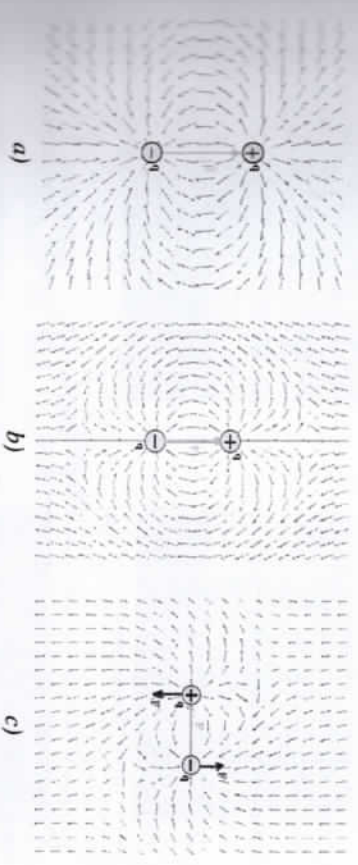


Рисунок 5.10

А на рисунке 5.11 изображено простейшее изображение электрического поля диполя, введенного во внешнее электрическое поле.

Изучение электрических диполей и их взаимодействие с электрическим полем считается чрезвычайно важным, особенно его значение при изучении диэлектриков и их свойств.

*Диэлектрик, введенный в электрическое поле:*

Диэлектриками называют вещества, проводящие ток с очень низкой или вообще не проводящие. Электроны, находящиеся на самом внешнем слое молекулы и атомов, из которых состоят диэлектрики, также достаточно прочно связаны с ядром, на которое эти электроны оказывают очень сильное внешнее воздействие (тепло, свет, электрический ток и т. д.). в противном

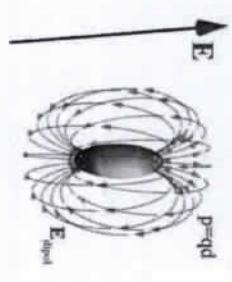


Рисунок 5.11

случае он почти не может вообще покинуть ядро и стать свободным электроном.

К диэлектрикам в обычных условиях относятся все газы, вода, стекло, различные пластмассы и резина. В диэлектриках, где заряд генерируется телом, этот заряд остается в этом месте и не перемещается в другое место тела. Это связано с отсутствием свободных электронов или других носителей заряда, которые несут заряд. Это связано с отсутствием свободных электронов или других носителей заряда, которые несут заряд. В диэлектриках свободные электроны находятся в диапазоне концентрации  $n = 10^{11} - 10^{21} \text{ м}^{-3}$ , и поэтому проводимость диэлектриков практически не ощущается вообще.

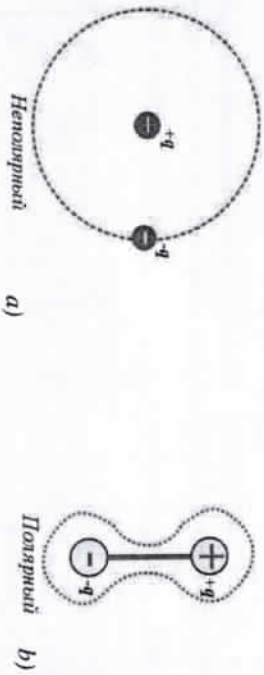


Рисунок 5.12

Существует 2 вида диэлектриков: 1) неполярные диэлектрики; 2) полярные диэлектрики.

Остановимся на каждом из них в отдельности.

1) неполярные диэлектрики.

Диэлектрик, состоящий из атомов и молекул, центры положительных и отрицательных зарядов которых перекрываются, называется неполярным диэлектриком (рис.5.12-а). При отсутствии электрического поля положительные и отрицательные заряды в молекулах и атомах неполярных диэлектриков совпадают друг с другом, но при введении этого диэлектрика в электрическое поле происходит сдвиг по полю его зарядов в атомах и молекулах. Отрицательные заряды движутся вдоль поля, в то время как положительные заряды слегка движутся в направлении, противоположном полю. В результате возникает плечо между положительными и отрицательными зарядами молекул и атомов. Это приводит к появлению полюсов. Другими словами, внешнее электрическое поле деформирует электронные оболочки атомов и молекул.

Поляризация, возникающая таким образом, называется деформационной поляризацией. В результате поляризации возникает небольшой

электрический диполь. Электрическое поле этого электрического диполя направлено против внешнего электрического поля. Следовательно, диэлектрики, состоящие из неполярных молекул и атомов, при введении в электрическое поле ослабляют внешнее электрическое поле, хотя и очень незначительно. Это обычно трудно заметить с помощью специальных инструментов.

2) Полярные диэлектрики.

Диэлектрик, состоящий из атомов и молекул, центры положительных и отрицательных зарядов которых не перекрываются, называется полярным диэлектриком (рис.5.12-б). Молекулы и атомы полярных диэлектриков естественным образом образуют электрические диполи.

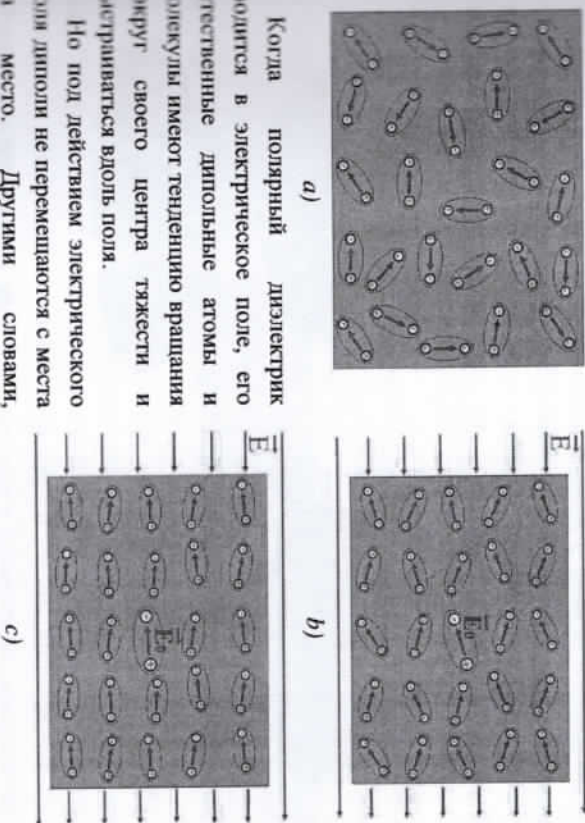


Рисунок 5.13

электрическое поле дает дипольно ориентальное движение.

При этом ориентация каждой молекулы или атома меняется. Поэтому такую поляризацию называют ориентационной поляризацией. Поскольку молекулы также участвуют в тепловом движении, полярные диэлектрики при введении в электрическое поле совершают колебательное движение вокруг направления внешнего электрического поля. Чем сильнее внешнее поле, тем больше полярные молекулы стремятся к упорядоченному расположению в направлении поля. При этом каждый диполь образует вторичные поля  $E_0$ .

направленные против внешнего электрического поля. По мере увеличения внешнего электрического поля  $\vec{E}_0$  поля также пропорционально увеличиваются (рис. 5.13-а, б, с). Поля, образованные каждой полярной молекулой  $\vec{E}_0$ , вызывают геометрическое сложение и ослабление внешнего поля в  $\epsilon$  раз. Следовательно, результирующее напряженное электрическое поля внутри диэлектрика будет в  $\epsilon$  раз меньше, чем напряженное внешнее поля.

$$E_{\text{внутр}} = \frac{E_{\text{внеш}}}{\epsilon} \quad (5.6)$$

Неполярные диэлектрики не могут ослабить внешнее электрическое поле так же, как их полярные молекулы. Потому что электрические моменты диполей намного больше в полярных молекулах. Следовательно, значения диэлектрической проницаемости также будут намного больше в полярных диэлектриках, чем в неполярных. Среди полярных диэлектриков электрический момент молекулы воды является наибольшим, а значение диэлектрической проницаемости для воды равно  $\epsilon=81$ .

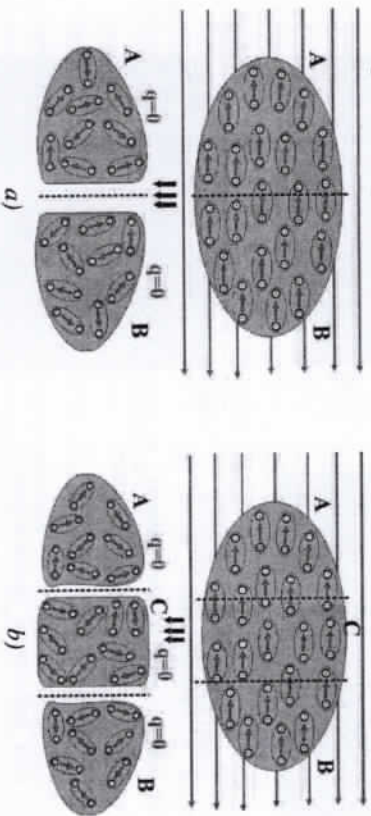


Рисунок 5.14

Диэлектрики, включенные в электрическое поле, называются двух-, трех-... при разрезании на части и последующем выносе за пределы поля все фрагменты остаются электронейтральными (рис. 5.14-а, б). Потому что в диэлектриках наблюдается только поляризация (диполь вращается вокруг центра тяжести молекулы и выстраивается вдоль поля). Лавины зарядов не наблюдается, как в проводниках.

Вопросы по теме:

1. Что называется проводником? Какова концентрация свободных электронов в них?
2. Что такое явление электростатической индукции? Как насчет электрического поля внутри проводника?

3. Что наблюдается вблизи внешней поверхности проводников, введенных в электрическое поле?
4. Что называют диэлектриками? Какова концентрация свободных электронов в них? Какие бывают виды диэлектриков?
5. Что такое ориентационная и деформационная поляризация?
6. Что такое диэлектрическая проницаемость? Каково значение диэлектрической проницаемости для полярных и неполярных диэлектриков?

**Решение задач:**

1. Медвежстра отравляет пациенту укол. Радиус поршня шприца составляет 1,1 см. медвежстра нажимает на поршень с силой 42 Н. Сколько дополнительного давления получит жидкость при этом?

Дано:

$$F=42 \text{ Н}$$

$$r=1,1 \text{ см}$$

$$\Delta P=?$$

Решение:

Находим поверхность поршня.

$$S = \pi r^2 = 3,14 \cdot (1,1 \cdot 10^{-2})^2 = 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Находим дополнительное давление.

$$\Delta P = \frac{F}{S} = \frac{42}{3,8 \cdot 10^{-4}} = 1,105 \cdot 10^5 \text{ Па} = 110,5 \text{ кПа}$$

Ответ:  $\Delta P = 110,5 \text{ кПа}$

**§ 6. ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ. РАБОТА, ВЫПОЛНЯЕМАЯ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ТОЧЕЧНОГО ЗАРЯДА. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ.**

Понятие напряженности электрического поля, характеризующее электрическое поле с точки зрения силы, мы уже ввели в предыдущих темах. Но есть такая величина, которая также характеризует электрическое поле с энергетической точки зрения, это потенциал поля. В этой теме мы поговорим о потенциале электрического поля и работе, выполняемой при перемещении заряда.

**Нотация электрического поля:**

Пусть электрическое поле образует заряд  $Q$ , и в разные точки этого поля входит заряд  $q$ . Пусть пробные заряды  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ . В этих точках потенциальные энергии пробных зарядов равны соответственно  $W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$ . Пусть  $W_n$  (рис. 6.1).

$$W_1 = k \frac{Qq_1}{\epsilon r_1}, \quad W_2 = k \frac{Qq_2}{\epsilon r_2}, \quad W_3 = k \frac{Qq_3}{\epsilon r_3}, \quad \dots, \quad W_n = k \frac{Qq_n}{\epsilon r_n}$$

Так как при делении этих энергий на внесенные пробные заряды образуется величина, не зависящая от величины пробного заряда, то есть:

$$W_1 = k \frac{Q}{\epsilon r_1}, \quad W_2 = k \frac{Q}{\epsilon r_2}, \quad W_3 = k \frac{Q}{\epsilon r_3}, \dots, \quad W_n = k \frac{Q}{\epsilon r_n}$$

Отношение потенциальной энергии пробного заряда, введенного в электрическое поле, к пробному заряду не зависит от величины пробного заряда, и это отношение называется потенциалом электрического поля в этой точке (точке, в которую вводился пробный заряд).

$$\varphi = \frac{W}{q} \quad (6.1)$$

Потенциалу электрического поля также дается следующее определение:

Александро Джузеппе Анастасио Джеронамо Уидерно Вольта родился 18 февраля 1745 года в Коно, Италия. Помимо того, что он физик, химик и физиолог, он также является одним из основателей, который изучал электричество. В 1792-1794 годах он проводил опыты с электрическим током на различных животных и открыл образование тока в замкнутом контуре. Вольтта пометшил медные и цинковые пластины в кислоте в 1800 году и первым в мире химическая пилка создал источник постоянного тока. Этот источник тока считается родоначальником современных аккумуляторов. Он также известен как изобретатель ряда других электрических приборов, включая электрофор, электрометр, конденсатор, электроскоп. Вольтта также изменил разность контактных потенциалов между двумя разными металлами. Он также работал в области химии и изобрел горючий газ метан в 1776 году. В настоящее время единицей измерения потенциала, напряжения и ЭДС является Вольт, названный в его честь. Вольтта умер 5 марта 1827 года в Коно, где он родился.



Alessandro Giuseppe Volta (1745–1827)

Потенциалом в точке электрического поля называют величину, количественно равную работе, выполняемой полем при перемещении единичного в эту точку положительного единичного пробного заряда до бесконечности (в точку, не являющуюся полем, за пределы поля).

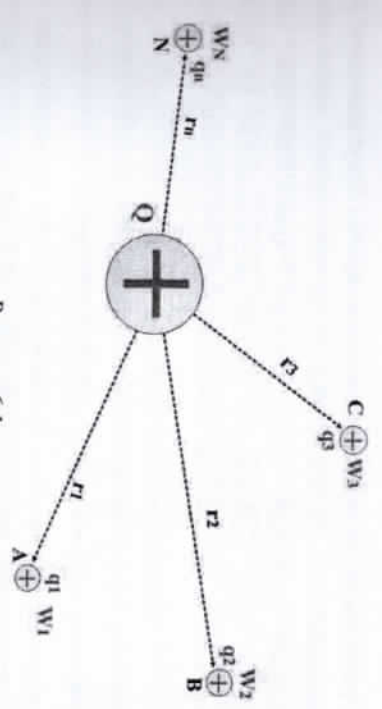


Рисунок 6.1

Если электрическое поле выполняет работу 1 Дж при перемещении положительного единичного пробного заряда, введенного в электрическое поле, из точки, в которую введен заряд, за пределы поля, то потенциал поля в этой точке равен 1 В (Вольт).

$$1В = \frac{1Дж}{1Кл} \quad (6.2)$$

Потенциал электрического поля-скалярная величина, характеризующая электрическое поле с энергетической точки зрения. (+) знаковый потенциал генерируется вокруг (+) знаковых зарядов, а (-) знаковый потенциал генерируется вокруг (-) знаковых зарядов. Чтобы найти результирующий потенциал в точке поля, возникающие каждым зарядом в этой точке, складываются алгебраически.

$$\varphi_{\text{рез}} = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_N \quad (6.3)$$

В разделе механики мы говорили, что любое тело или система тел, на которые действует сила, независимо от ее природы, будет иметь свою собственную энергию действия (потенциальную). Следовательно, этот вывод также относится к электрическим силам. Теперь изучим природу электрических сил в энергетическом аспекте.

**Электрическое поле является потенциальным полем:**

Если работа, выполняемая силой, зависит от формы траектории, эту силу называют консервативной силой и наоборот, неконсервативной силой. Поле действия консервативных сил называется потенциальным полем. Попробуем ответить на вопрос, является ли поле, порождаемое электрическими зарядами, потенциальным полем или нет.

Переместим точечный заряд q, находящийся в однородном электрическом поле, из точки A в точку N по произвольной криволинейной траектории. Итак, какая работа выполняется в этом? АВ траектории АВ, ВС, CD, DE,...

разберем по отрезкам. Пусть эти разделенные отрезки будут настолько малы, что перекрывают эти отрезки дугами. Тогда эти отрезки можно назвать элементарными отрезками  $\vec{AB}, \vec{BC}, \vec{CD}, \vec{DE}, \dots$  (рис.6.2-а). Для каждой элементарной части выполненная работа рассчитывается по формуле  $A = F \cdot s \cdot \cos \alpha$  а сложив их, находит выполненную работу по общей траектории.

$$A = \sum A_i = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_N = F_1 \Delta l_1 \cos \alpha_1 + F_2 \Delta l_2 \cos \alpha_2 + F_3 \Delta l_3 \cos \alpha_3 + \dots + F_N \Delta l_N \cos \alpha_N = qE \cdot (AB \cos \alpha_1 + BC \cos \alpha_2 + CD \cos \alpha_3 + \dots + MN \cos \alpha_N) = qE \cdot (\Delta d_1 + \Delta d_2 + \Delta d_3 + \dots + \Delta d_N) = qE d$$

Как видно из рисунка,  $d$  – проекция траектории на направление поля. Отсюда следует, что работа, выполняемая при перемещении точечного заряда в электрическом поле по формуле  $A = qEd$ , будет зависеть от проекции траектории на направление поля, а не полностью зависеть от формы траектории. Формы траекторий различны, но равная работа выполняется на всех траекториях, проекции траектории на направление поля которых равны одному и тому же (рис.6.2-б).

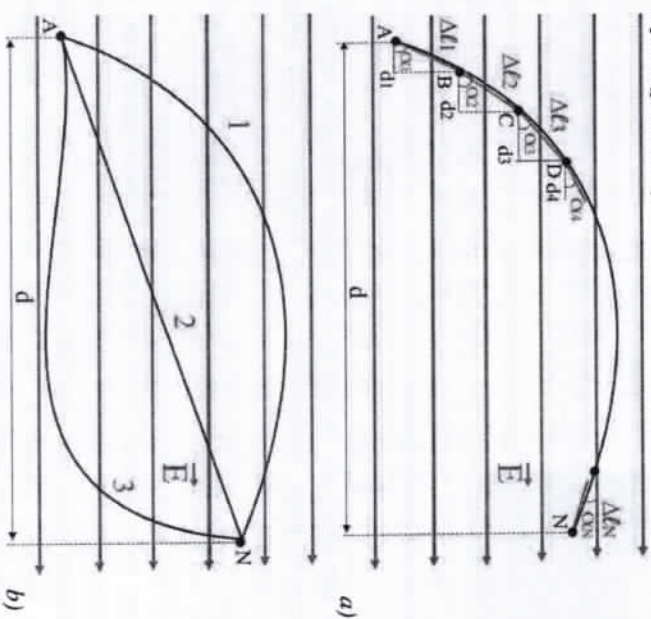


Рисунок 6.2

Независимо от формы траектории, если  $d=0$ , выполненная работа равна нулю. Другими словами, если работа не выполняется при перемещении

заряда по замкнутому контуру в электрическом поле. Подводя итог вышесказанному, можно сказать, что действительно электрическая сила является консервативной силой, тогда как поле этой силы является потенциальным полем. Работа, выполняемая при перемещении заряда, не зависит от формы траектории, а при перемещении заряда по замкнутому контуру работа не выполняется.

**Работа, выполняемая при перемещении точечного заряда:**

Работа, выполняемая при перемещении точечного заряда в однородном поле, будет выглядеть следующим образом:

$$A = qE l \cos \alpha = qEd \tag{6.4}$$

Где:  $d$  – проекция траектории по направление поля.

Иногда естественно, что вопрос о том, какой будет выполненная работа, возникает, если точечный заряд переместить по произвольной траектории в неоднородном поле. Предположим, что точечный заряд  $q$ , который неподвижен и находится в поле положительного заряда  $Q$ , перемещается из точки  $A$  в точку  $N$  по произвольной траектории (рис. 6.3). Пусть расстояние точки  $A$  от заряда  $Q$  равно  $r_A$ , а расстояние точки  $N$  –  $r_N$ . Поместим заряд  $Q$  в начало координатной плоскости. Начало и конец траектории имеют координаты  $A(x_A; y_A)$  и  $N(x_N; y_N)$ . Пусть заряд  $q$  находится в произвольной точке траектории  $(x; y)$ . При этом радиус вектором будет  $\vec{r} = x \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j}$ . И сила притяжения, воздействующая на него, будет  $F = k \frac{Qq}{r^2}$ . Будут проекции Кулоновской силы на оси.

$$F_x = F \cdot \cos \alpha = k \frac{Qq}{r^2} \cdot \frac{x}{r} = k \frac{Qq}{r^3} \cdot \frac{x}{r} = k \frac{Qq}{(x^2 + y^2)^{3/2}} \cdot x \quad \text{и} \quad F_y = F \cdot \cos \beta = k \frac{Qq}{r^2} \cdot \frac{y}{r} = k \frac{Qq}{(x^2 + y^2)^{3/2}} \cdot y$$

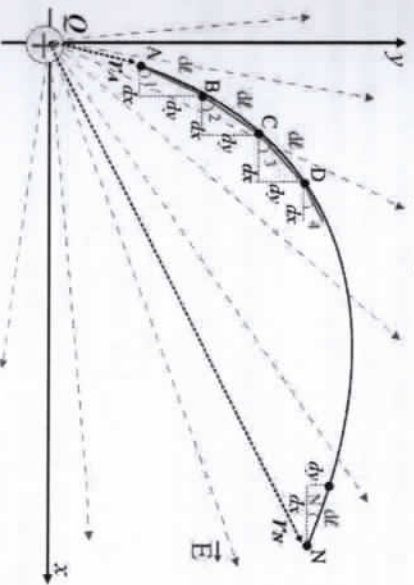


Рисунок 6.3



Сила выражается в виде через векторные проекции  $\vec{F} = F_x \vec{i} + F_y \vec{j}$ . Разбиваем траекторию на равные отрезки  $d\ell$ , имеющие элементарные длины  $AB, BC, CD, DE, \dots$ . Это будет элементарная работа, выполненная в одном из отрезков.

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{\ell} = (F_x \vec{i} + F_y \vec{j}) \cdot (dx \vec{i} + dy \vec{j}) = F_x dx + F_y dy$$

Сумма работ, выполненных на каждом элементарном отрезке, дает работу, выполненную на всей траектории. Чем больше число отрезков, тем точнее получится расчет, и знак  $\sum$  превратится в знак  $\int$ .

$A = \sum_{i=1}^N \Delta A_i = \int dA$  интегрируем по формуле. Тогда формируется результат.

$$A = \int dA = \int F_x dx + F_y dy = \int_{x_A}^{x_N} k Q q \frac{x}{(x^2 + y^2)^{3/2}} dx + \int_{y_A}^{y_N} k Q q \frac{y}{(x^2 + y^2)^{3/2}} dy = -k Q q \frac{1}{(x^2 + y^2)^{1/2}} \Big|_{x_A}^{x_N} - k Q q \frac{1}{(x^2 + y^2)^{1/2}} \Big|_{y_A}^{y_N} = \dots = -k Q q \left( \frac{1}{r_N} - \frac{1}{r_A} \right) = k Q q \cdot \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_N} \right)$$

Отсюда следует, что работа, выполняемая электрическим полем при перемещении заряда, будет следующей (рис. 6.3):

$$A = k Q q \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_N} \right) \quad (6.5)$$

Из приведенной выше формулы также видно, что работа, выполняемая в электрическом поле, не зависит от формы траектории, а зависит только от начальной и конечной положений.

#### Потенциальная энергия:

С общим определением потенциальной энергии мы познакомились в разделе механики. По этому определению находим потенциальную энергию точечного заряда, находящегося в электрическом поле. Потенциальная энергия будет из формулы.

$$W = \vec{F} \cdot \vec{r} = F r \cos \alpha = k \frac{Qq}{r^2} r \cdot 1 = k \frac{Qq}{r}$$

Следовательно, потенциальная энергия точечного заряда в электрическом поле будет:

$$W = k \frac{Qq}{r} \quad (6.6)$$

Отсюда следует, что работа, выполняемая при перемещении точечного заряда в Центральном силовом поле, будет равна разности потенциалов в начале и в конце траектории.

$$A = k Q q \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) = k \frac{Qq}{r_A} - k \frac{Qq}{r_B} = W_A - W_B \quad (6.7)$$

Если из формулы потенциала электрического поля  $\phi = \frac{W}{q}$  в приведенную

выше формулу поместить потенциальную энергию  $W = q\phi$ , то формула для выполненной работы будет сформирована.

$$A = W_A - W_B = q\phi_A - q\phi_B = q(\phi_A - \phi_B) \quad (6.8)$$

Это значит, что совершенная работа в электрическом поле не зависит от траектории.

#### Вопросы по теме:

1. Что называется потенциалом электрического поля? Что характеризует потенциальное поле?
2. Какую величину имеет потенциал электрического поля? Когда потенциал положительный, а когда отрицательный? Как добавит несколько потенциалов?
3. Какое выражение работы, выполняемой при перемещении заряда в электрическом поле?
4. Какова потенциальная энергия заряда в электрическом поле?

#### Решение задач:

1. Какой будет энергия разряда (МДж), если вычитание потенциалов между Землей и облаком равно  $10^6$  В, а количество электричества, прошедшего за время разряда, равно 25 Кл?

- A) 0,4 B) 2,5 C) 4 D) 25

Дано:

$$\Delta\phi = 10^6 \text{ В}$$

$$q = 25 \text{ Кл}$$

$$W = ?$$

Решение:

Используем следующую формулу:

$$\Delta W = q \cdot \Delta\phi$$

$$W = q \cdot \Delta\phi = 25 \cdot 10^5 = 2,5 \cdot 10^6 = 2,5 \text{ МДж}$$

Ответ: B) 2,5.

2. На диоде электрон досиет анода со скоростью  $8 \cdot 10^6$  м/с. Какое напряжение анода (В), если скорость электрона вблизи катода равна нулю? Масса электрона составляет  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг, а заряд  $-1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

- A) 220 B) 160 C) 180 D) 280

Дано:

$$g = 8 \cdot 10^6 \text{ м/с}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

Решение:  
Используем следующую формулу:

$$eU = \frac{mg^2}{2}, \rightarrow U = \frac{mg^2}{2e}$$

$$U = \frac{mg^2}{2e} = \frac{9 \cdot 10^{-31} \cdot 64 \cdot 10^{12}}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 180 \text{ В}$$

U = ?

Ответ: 180 В

### § 7. ПОТЕНЦИАЛЫ ЗАРЯЖЕННЫХ ПРОВОДНИКОВ. ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ. ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ ДЛЯ ПОТЕНЦИАЛОВ.

**Потенциалы заряженных проводников:**

Когда проводник произвольной формы заряжен, его заряд оседает вдоль поверхности проводника. Потому что в проводниках заряд свободно перемещается из одной точки в другую. Поскольку проводник представляет собой элементарную частицу с одинаковым зарядом, то они как можно дальше друг от друга располагаются в самом крайнем месте, т. е. на поверхности проводника. Независимо от формы проводника, электрические потенциалы одинаковы во всех точках его поверхности. Если в какой-то точке проводника потенциал больше, то следует знать, что распределение заряда по поверхности проводника еще не достигло конца. Электрическое поле заставляет заряд двигаться из точки с большим потенциалом в точку с меньшим потенциалом, и этот лавинный ток будет продолжаться до тех пор, пока потенциал не станет равным во всех точках поверхности проводника.

Теперь приведем потенциалы различных заряженных проводников. Сначала рассчитаем для заряженной сферы или поверхности сферы. По определению потенциал будет.

$$W = k \frac{Qq'}{\epsilon R q'} = k \frac{Q}{\epsilon R}$$

Следовательно, на поверхности поверхности заряженной сферы ( $r=R$ ) потенциал будет:

$$\phi_0 = k \frac{Q}{\epsilon R} \quad (7.1)$$

Теперь вычислим потенциалы для внутренних точек сферы. Так как внутри сферы нет электрического поля  $U = \phi_1 - \phi_2 = E \Delta d = 0$ , то есть  $\phi_1 = \phi_2$ . Если сфера находится в вакууме, потенциал во всех точках на ее поверхности и внутри будет одинаковым и равным  $\phi = k \frac{Q}{R}$ .

Следовательно, потенциал одинаков во всех точках внутри поверхности заряженной сферы ( $r < R$ ) и будет:

$$\phi = k \frac{Q}{\epsilon R} \quad (7.2)$$

Расчеты показали, что потенциалы электрического поля одинаковы не только внутри сферы, но и внутри всех поверхностей заряженных проводников произвольной формы.

В диэлектриках, где заряд возникает телом, он остается там, где он есть. Заряд не легко перемещается из одного места в другое. Потому что диэлектрики не имеют свободных электронов, которые несут заряд. Если заряд возникает по всему объему тела, этот заряд остается по объему, не выходя на поверхность, как в проводниках. Теперь рассмотрим потенциал объемами заряженного шара. Для начала посмотрим, каким будет потенциал в центре объемами заряженного шара. Отделим слой элементарной сферы толщиной  $dr$  на расстоянии  $r$  от центра сферы. Это и будет элементарный заряд  $dq = \rho dV = 4\pi r^2 \rho dr$  (рис. 7.1). Это будет элементарная потенциальная энергия  $dW_r = k \frac{q \cdot dq}{r} = 4\pi r k q r dr$ , вызванная притяжением пробного заряда  $q$ , который находится в центре элементарного слоя и сферы. Можно найти полную потенциальную энергию, интегрируя ее в интервал от 0 до  $R$ .

$$W_r = \int_0^R dW_r = \int_0^R 4\pi r k q r dr = 2\pi r k q R^2 = \frac{3}{2} k R \cdot \frac{4}{3} \pi R^3 \cdot q \cdot \frac{1}{R} = \frac{3}{2} k R^2 V q = \frac{3}{2} k \frac{Qq}{R} = \frac{3}{2} W_0$$

По определению потенциал будет:

$$\phi = \frac{W}{q} = \frac{3}{2} k \frac{Q}{R} = \frac{3}{2} \phi_0$$

Таким образом, потенциал электрического поля в центре объемами заряженной сферы определяется по формуле (рис. 7.1):

$$\phi = \frac{3}{2} \cdot k \frac{Q}{R} = \frac{3}{2} \phi_0 \quad (7.3)$$

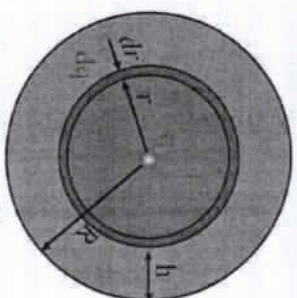


Рисунок 7.1

Следовательно, из приведенной выше формулы можно сделать вывод, что потенциал в центре сферы будет в количественном отношении больше, чем на ее поверхности.

Теперь определим потенциал в произвольной внутренней точке объемами заряженного шара. Чтобы найти его, достаточно найти работу, выполненную при перемещении  $q$ -заряда от центра сферы на расстояние  $r$ . Внутри сферы с

радиусом  $r$  условно разделим сферу с произвольным радиусом (рис. 7.2)  $r' (0 < r' < r)$ .

$$\text{Заряд сферы равно: } q' = \rho V' = \rho \cdot \frac{4}{3} \pi r'^3 = \rho \cdot \frac{4}{3} \pi R^3 \cdot \left(\frac{r'}{R}\right)^3 = Q \left(\frac{r'}{R}\right)^3$$

Этот шар и пробный заряд  $q$  притягиваются силой.

$$F' = k \frac{q' q}{r'^2} = k \frac{Q q}{R^3} \cdot r'$$

Под действием этой силы элементарная работа выполняется при перемещении пробного заряда на элементарное расстояние.

$$dA = F' \cdot dr = k \frac{Q q}{R^3} \cdot r' \cdot dr$$

Найдем работу, выполненную при перемещении пробного заряда  $q$  на расстояние  $r$  от центра сферы, интегрируя элементарную работу от 0 до  $r$ .

$$A = \int_0^r dA = \int_0^r F' \cdot dr = k \frac{Q q}{R^3} \cdot \int_0^r r' \cdot dr = k \frac{Q q}{R^3} \cdot \frac{r^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot k \frac{Q q}{R} \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2$$

На расстоянии  $r$  от центра сферы будет потенциальная энергия заряженного тела.

$$W_r = W_0 - A = \frac{3}{2} k \frac{Q q}{R} - \frac{1}{2} k \frac{Q q}{R} \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2$$

По определению потенциал будет:

$$\varphi = \frac{W}{q} = \frac{3}{2} k \frac{Q}{R} - \frac{1}{2} k \frac{Q}{R} \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 = \frac{1}{2} \varphi_0 \left(3 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right)$$

Таким образом, потенциал электрического поля на расстоянии  $r$  от центра объемно заряженного шара (или на глубине, равной  $h$  от поверхности шара) будет равен (рис. 7.2):

$$\varphi_r = \frac{3}{2} k \frac{Q}{R} - \frac{1}{2} k \frac{Q}{R} \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 = \frac{1}{2} \varphi_0 \left(3 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) \quad (7.4)$$

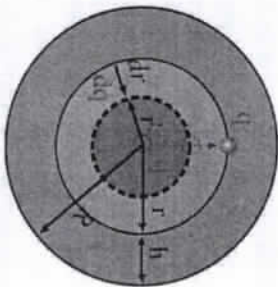


Рисунок 7.2

Независимо от того, является ли сфера объемно или поверхностно заряженной, в точках вне сферы ( $r > R$ ) возникает поле потенциала электрического поля одинаковы. Значение потенциала поля будет таким же, как и значение, возникающее, когда весь заряд сферы сосредоточен в одной точке в центре сферы. Вне сферы потенциал поля будет:

$$\varphi = k \frac{Q}{\epsilon r} = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0 r} \quad (7.5)$$

На приведенных ниже рисунках изображен график зависимости потенциалов электрического поля, образованного поверхностными и объемными заряженными шарами, от расстояния (рис. 7.3).

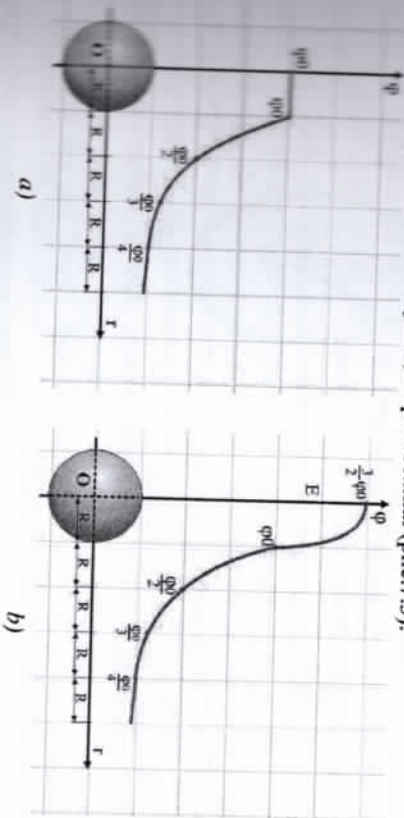


Рисунок 7.3

Приведенные выше изображения приведены для случая, когда сферы заряжены положительно. Для отрицательно заряженного случая абсциссы наводятся ниже, симметрично оси. Теперь вычислим потенциал в произвольной точке на оси заряженного кольца. К центру кольца с радиусом  $R$  положим систему координат, как показано на рисунке (рис. 7.4). Вычтем из произвольной точки  $A$  кольца элементарный отрезок длиной  $dl$ . Элементарный заряд элементарной части равен  $dq = \tau \cdot dl$ , этот заряд создает элементарный потенциал в произвольной точке  $M$ , взятой на расстоянии  $L$  от оси кольца  $d\varphi = k \frac{dq}{\epsilon r} = k \frac{\tau \cdot dl}{\epsilon r}$ . Интегрируя этот элементарный потенциал поля от 0 до  $2\pi R$ , найдем результирующий потенциал, образованный в точке  $M$  данного кольца, т. е. будет:

$$\varphi = \int d\varphi = \frac{k \tau}{\epsilon r} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{k \tau}{\epsilon r} \cdot 2\pi R = \frac{1}{4\pi \epsilon_0 \epsilon r} \cdot \frac{\tau}{2\pi R} = \frac{\tau}{2\epsilon_0 \epsilon r} \cdot \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2}}$$

Если вместо линейной плотности кольца  $\tau$  дать заряд  $Q$ , то для потенциала имеем следующую формулу.

$$\varphi = \frac{\tau}{2\epsilon_0 \epsilon} \cdot \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2}} = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0 \epsilon R} \cdot \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2}} = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0 \epsilon \sqrt{R^2 + L^2}} = k \frac{Q}{\epsilon r}$$

Таким образом, потенциал электрического поля в точке, лежащей на расстоянии  $L$  от центра кольца радиусом  $R$  с равномерным зарядом, выглядит следующим образом (рис. 7.4):

$$\varphi = \frac{\tau}{2\epsilon\epsilon_0} \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2}} \quad (7.6)$$

или

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 \sqrt{R^2 + L^2}} = k \frac{Q}{\epsilon r} \quad (7.6a)$$

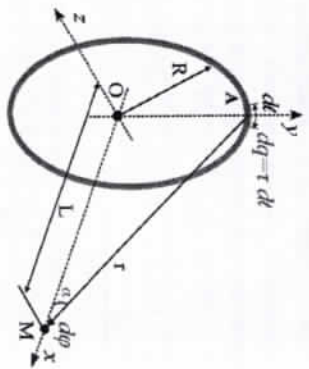


Рисунок 7.4

Из приведенной выше формулы видно, что в центре кольца с равномерным линейно заряженным радиусом  $R$  потенциал имеет свое наибольшее значение  $\varphi = k \frac{Q}{\epsilon R}$ , начиная с этой точки, так как потенциал уменьшается по закону  $\varphi \sim \frac{1}{r}$ . Теперь вычислим потенциал в произвольной

точке на оси равномерно заряженного диска. Отделим от диска кольцо произвольного радиуса  $r$  ( $r \leq R$ ) произвольной толщины  $dr$  (рис. 7.5). Элементарным зарядом кольца равно  $dq = 2\pi r \sigma dr$ , элементарный полевой потенциал в точке  $M$ , взятый из оси кольца, будет равен:

$$d\varphi = \frac{k dq}{\epsilon \sqrt{r^2 + L^2}} = \frac{2\pi r \sigma dr}{4\pi\epsilon\epsilon_0 (r^2 + L^2)^{3/2}} = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0} \frac{r dr}{(r^2 + L^2)^{3/2}}$$

Интегрируя это с 0 до  $R$ , мы найдем потенциал диска в данной точке:

$$\varphi = \int d\varphi = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0} \int_0^R \frac{r dr}{(r^2 + L^2)^{3/2}} = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0} \cdot (r^2 + L^2)^{-1/2} \Big|_0^R = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0} (\sqrt{R^2 + L^2} - L)$$

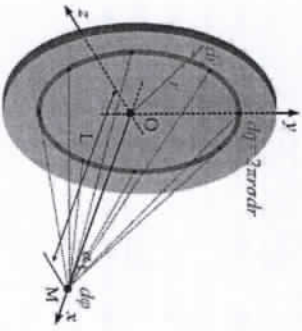


Рисунок 7.5

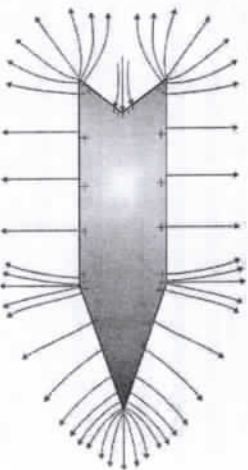


Рисунок 7.6

Таким образом, потенциал электрического поля в точке, лежащей на расстоянии  $L$  от центра равномерного заряженного диска радиусом  $R$ , выглядит следующим (рис. 7.5):

$$\varphi = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0} (\sqrt{R^2 + L^2} - L) \quad (7.7)$$

Естественно, что при зарядке проводника произвольной формы возникает вопрос, в какой его части больше всего накапливается заряд. Для этого давайте проанализируем, в каком шаре плотность заряда больше при заряде сфер радиусом  $R_1$  и  $R_2$ , соприкасающихся друг с другом. Так как сферы соприкасаются, то их потенциалы равны  $\varphi_1 = \varphi_2$  между собой. Из этого следует:

$$k \frac{q_1}{R_1} = k \frac{q_2}{R_2} \rightarrow \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 R_1^2} \cdot R_1 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 R_2^2} \cdot R_2 \rightarrow \frac{q_1}{S_1} \cdot R_1 = \frac{q_2}{S_2} \cdot R_2 \rightarrow \sigma_1 R_1 = \sigma_2 R_2$$

Следовательно, оказывается, что отношение поверхностных плотностей равно обратному отношению размеров.

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{R_1}{R_2} \quad (7.8)$$

Из формулы видно, что чем больше поверхностная плотность заряда, тем больше его будет меньше, т. е. чем темнее заряд в маленькой сфере, тем больше она будет плотней. Следовательно, чем меньше радиус проводника произвольной формы, т. е. чем больше его кривизна, тем больше заряд накапливается в его более острых участках (рис. 7.6). Поэтому в пасмурные дни в низовых, возвышенных местах заряд скапливается больше, и в такие места попадает молния.

#### Энергия заряженного шара:

При зарядке тел с увеличением его заряда увеличивается и его потенциал. Поскольку потенциал означает способность выполнять работу, это означает, что электрическая (потенциальная) энергия заряженного тела также увеличивается. Полученный заряд изолированного проводника в общем случае прямо пропорционален его потенциалу и находится по формуле  $q = C \cdot \varphi$ . Об этом будем подробно рассказывать в следующей теме. На любом графике, где связаны заряд и потенциал, граничная поверхность дает работу, выполняемую при зарядке, то есть энергию, получаемую заряженным телом.

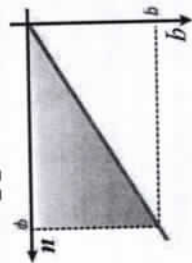
С помощью рисунка 7.7 можно узнать, что поверхность ограниченного треугольника является  $W = \frac{1}{2} q \cdot \varphi$ . Также можно будет привести формулы

$$W = \frac{C \varphi^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

Следовательно, при зарядке изолированного проводника в общем случае энергия, передаваемая ему, будет равна (рис. 7.7):

$$W = \frac{1}{2} q \varphi = \frac{C \varphi^2 - q^2}{2} = \frac{q^2}{2C} \quad (7.9)$$

Рисунок 7.7



Если по приведенной выше формуле разложить формулу для емкости изолированного шара  $C = 4\pi\epsilon_0 R$ , то можно получить следующие три частные формулы для энергии изолированного шара:

$$W = \frac{1}{2} q \varphi = 2\pi\epsilon_0 R \varphi^2 = \frac{q^2}{8\pi\epsilon_0 R} \quad (7.10)$$

Итак, согласно приведенным выше формулам, получается, что энергия, получаемая при зарядке сферы, проводника в целом, пропорциональна квадрату потенциала в проводнике, т. е.  $W \sim \varphi^2$ .

**Расносить потенциалов, напряжений:**

Поле между параллельными пластинами с противоположными знаками и с одинаковым количеством зарядов можно назвать однородным полем. На испытательный заряд  $q'$ , введенный в однородное поле, электрически полем действует Кулоновская сила  $F_{\kappa} = q'E$ . А тело, находясь под воздействием, будет обладать влиянием (потенциальной) энергией. Определим потенциальную энергию пробного заряда в однородном электрическом поле. Можно воспользоваться общей формулой нахождения потенциальной энергии.

$$W = F \cdot r = q'E \cdot d = q' \varphi$$

Отсюда следует, что потенциальная энергия пробного заряда  $q'$ , введенного в однородное электрическое поле, будет равна (рис. 7.9):

$$W = q' E d = q' \varphi \quad (7.11)$$

Где:  $\varphi = Ed$  — потенциал однородного электрического поля в произвольной точке  $d$ ;  $d$  — расстояние от точки, на которой находится заряд, до пластины, на которую падает заряд. При перемещении пробного заряда  $q'$ , введенного в однородное электрическое поле, с расстояния  $d_1$  на расстояние  $d_2$  работа, выполняемая полем электр., будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} A = W_1 - W_2 = q' E (d_2 - d_1) = q' E \Delta d \\ A = q' (\varphi_1 - \varphi_2) = q' U \end{cases} \quad (7.12)$$



Рисунок 7.9

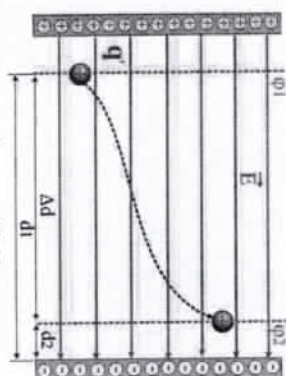


Рисунок 7.10

Теперь давайте создадим связь между напряжением электрического поля и напряжением. Если приравнять эти формулы к работе, выполняемой при перемещении заряда в однородном поле,

$$A = q' E \Delta d \quad \text{и} \quad A = q' U$$

$$E = \frac{U}{\Delta d}$$

Получается выражение. Следовательно, связь между напряжением электрического поля и напряжением будет:

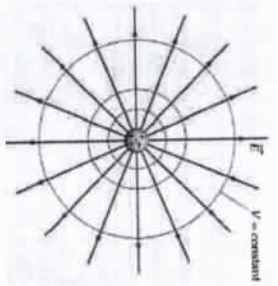
$$E = \frac{U}{\Delta d} \quad (7.13)$$

Из приведенной выше формулы следует, что напряженность электрического поля является единицей измерения  $\frac{В}{м}$ . Но мы уже упоминали в пункте 3, что напряжение является единицей измерения  $\frac{В}{Кв}$ . Следовательно, получается, что обе эти единицы измерения напряжения одинаково сильны между собой, то есть.

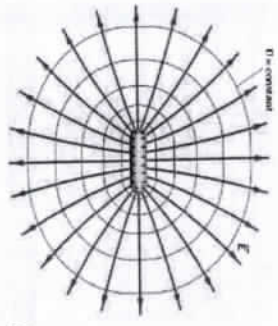
$$\left[ \frac{В}{Кв} \right] = \left[ \frac{В}{м} \right]$$

**Эквипотенциальные поверхности:**

Геометрическое место точек с одинаковыми потенциалами образует поверхность, называемую эквипотенциальной поверхностью. Также известно, что он дает значение с равным потенциалом. Эквипотенциальные поверхности точечных зарядов будут состоять из концентрических сфер. Для произвольных тел напряженность поля перпендикулярна поверхности тела, а эквипотенциальные поверхности перпендикулярны линиям этих напряжений (рис. 7.11). Потому что мы хорошо знаем, что выполненная работа равна нулю только тогда, когда угол между силой и перемещением взаимно перпендикулярен.



a)



b)

Рисунок 7.11

Во всех точках эквипотенциальной поверхности потенциалные энергии заряда одинаковы. Работа не выполняется при перемещении заряда из одной точки эквипотенциальной поверхности в любую другую точку. Потому что при этом потенциалная энергия не меняется. При перемещении заряда из произвольной точки одной эквипотенциальной поверхности в произвольную точку другой эквипотенциальной поверхности выполняется такая же работа  $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$ . Ниже опишем электрическое поле и эквипотенциальные поверхности системы зарядов, полученные с помощью компьютерной программы. Ниже на рисунке представлено поле точечного заряда и его эквипотенциальные поверхности в двух и трех измерениях.

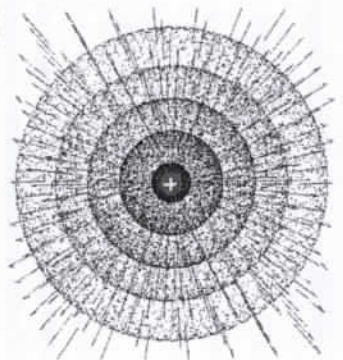
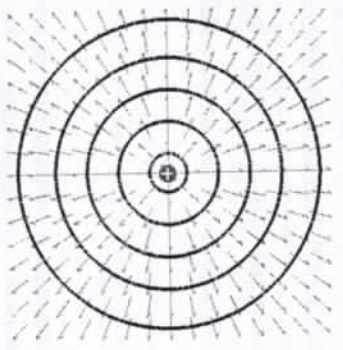


Рисунок 7.12

Ниже на рисунке показано поле, образованное двумя одинаковыми положительными точечными зарядами, и эквипотенциальные поверхности в двух и трех измерениях.

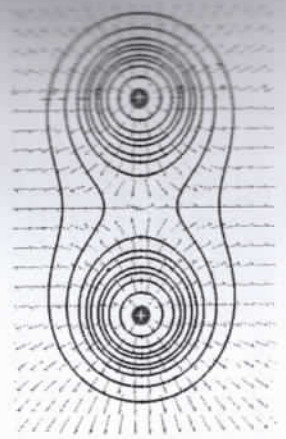


Рисунок 7.13

Ниже на рисунке показано поле и эквипотенциальные поверхности, образованные количеством равными и противоположно направленными точечными зарядами, в двух и трех мерных пространствах.

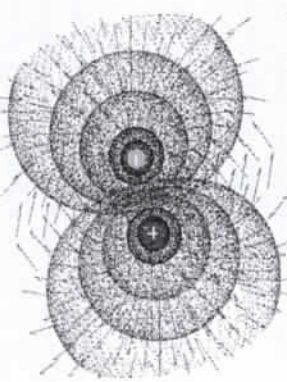
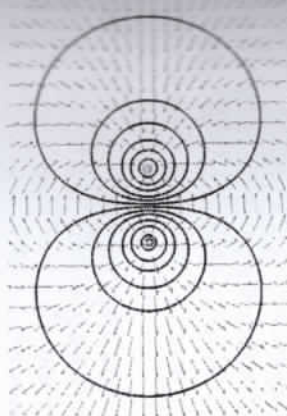


Рисунок 7.14

Ниже на рисунке показано поле и эквипотенциальные поверхности, образованные точечными зарядами, которые отличаются по величине в два раза,  $q_1$  в. равны  $q_1 = 10 \text{ нКл}$  и  $q_2 = -5 \text{ нКл}$  в двух, и в трех мерных.

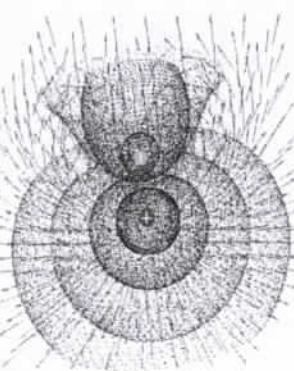
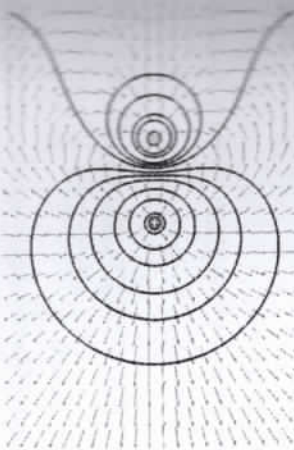


Рисунок 7.15

Ниже приведены примеры электрического поля и эквипотенциальных поверхностей, создаваемых системой зарядов.

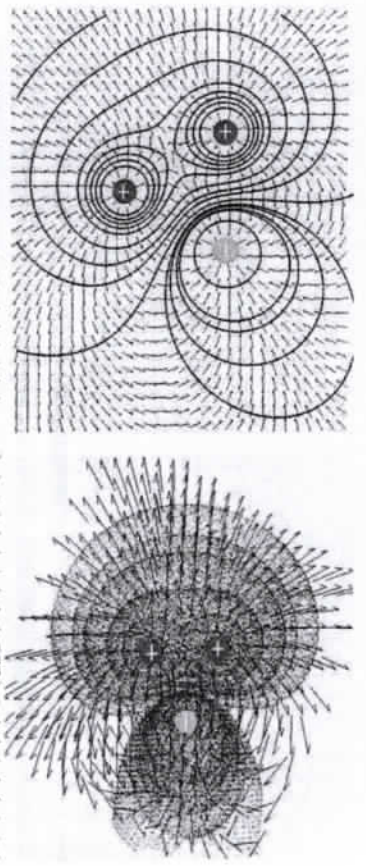


Рисунок 7.16

Ниже приведены примеры электрического поля и эквипотенциальных поверхностей, образованных линейным зарядом и линейным зарядом с противоположным знаком.

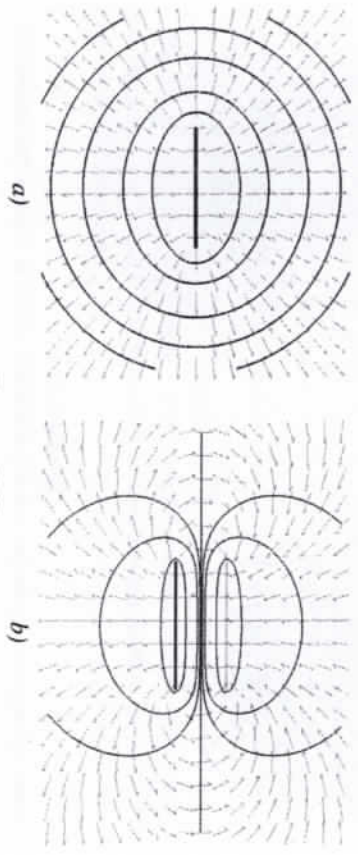


Рисунок 7.17

Из всех рисунков видно, что векторы напряженности поля в каждой точке направлены перпендикулярно эквипотенциальным поверхностям. Следовательно, при перемещении заряда по каждой эквипотенциальной поверхности работа не выполняется. Из приведенных выше изображений видно, что поверхности с меньшим положительным зарядом являются положительными эквипотенциальными поверхностями, а поверхности с меньшим отрицательным зарядом являются отрицательными эквипотенциальными поверхностями. Исходя из формулы  $\vec{E} = -\text{grad } \varphi$ , вектор напряженности электрического поля всегда должен быть направлен в сторону, где потенциал уменьшается быстрее всего. Согласно формуле  $\varphi = \frac{qQ}{r}$ , потенциал должен уменьшаться при удалении от положительного заряда или приближении к отрицательному заряду. Довказательство этих пунктов хорошо видно на всех рисунках, которые мы рассмотрели выше.

**Частные случаи для потенциалов:**

Теперь введем в виде формулы частные случаи, которые чаще всего встречаются при решении вопросов и работе по учету. Чтобы избежать путаницы, мы пронумеруем каждый случай.

1. Когда два разных заряженных шара соприкасаются друг с другом, заряд течет от большого шара с потенциалом к маленькому шару с потенциалом. Это продолжается до тех пор, пока потенциал не станет равным.

Считая потенциал сферы 1 большим, определим, сколько зарядов протечет при касании сфер, сколько зарядов образуется в каждой сфере и определим потенциал. Так как потенциал сферы 1 велик, то при касании сфер заряд будет течь от нее к сфере 2. Тогда в каждом шарике образуются заряды:

$$q_1' = q_1 - \Delta q \quad \text{и} \quad q_2' = q_2 + \Delta q$$

И результируйте в каждой сфере образуются потенциалы.

$$\varphi_1' = k \frac{q_1'}{R_1} = k \frac{q_1 - \Delta q}{R_1} \quad \text{и} \quad \varphi_2' = k \frac{q_2'}{R_2} = k \frac{q_2 + \Delta q}{R_2}$$

Когда потоки зарядов прекращаются, потенциалы выравниваются, т. е. стабилизируются.

$$\varphi_1' = \varphi_2' = \varphi'$$

Из этого мы можем найти искомые выражения.

$$k \frac{q_1 - \Delta q}{R_1} = k \frac{q_2 + \Delta q}{R_2}; \rightarrow q_1 R_2 - \Delta q R_2 = q_2 R_1 + \Delta q R_1; \rightarrow q_1 R_2 - q_2 R_1 = \Delta q (R_1 + R_2); \rightarrow \Delta q = \frac{q_1 R_2 - q_2 R_1}{R_1 + R_2}$$

$$q_1' = q_1 - \Delta q = q_1 - \frac{q_1 R_2 - q_2 R_1}{R_1 + R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (q_1 + q_2), \rightarrow q_2' = q_2 + \Delta q = q_2 + \frac{q_1 R_2 - q_2 R_1}{R_1 + R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (q_1 + q_2).$$

$$\varphi' = \varphi_1' = k \frac{q_1 - \Delta q}{R_1} = k \frac{q_1 - q_2 R_1}{R_1 + R_2} = k \frac{q_1 + q_2}{R_1 + R_2}.$$

Таким образом, если предположить, что радиус и заряды  $R_1, q_1$  и  $R_2, q_2$  соответственно и потенциал сферы 1 велик ( $q_1/R_1 > q_2/R_2$ ), количество заряда, которое переходит в сферу 2 при касании друг друга  $\Delta q$ , результирующий потенциал  $\varphi'$  и заряды, оставшиеся в каждой сфере  $q_1', q_2'$ , будут следующими:

$$\Delta q = \frac{q_1 R_2 - q_2 R_1}{R_1 + R_2}, \quad q_1' = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (q_1 + q_2), \quad q_2' = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (q_1 + q_2),$$

$$\varphi' = k \frac{q_1 + q_2}{R_1 + R_2} \quad (7.14)$$

2. Посмотрим, как будет выглядеть приведенная выше формула, если вместо зарядов сфер дать их потенциалы. Из потенциалов зарядов найдем суммы зарядов в сферах.

$$\begin{cases} \varphi_1 = k \frac{q_1}{R_1} \\ \varphi_2 = k \frac{q_2}{R_2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} q_1 = \frac{\varphi_1 R_1}{k} \\ q_2 = \frac{\varphi_2 R_2}{k} \end{cases}$$

Найдем запрошенные величины по готовым формулам, выведенным ранее. Это будет количество заряда, которое прошло от сферы 1 до сферы 2.

$$\Delta q = \frac{q_1 R_2 - q_2 R_1}{R_1 + R_2} = \frac{\frac{\varphi_1 R_1}{k} R_2 - \frac{\varphi_2 R_2}{k} R_1}{R_1 + R_2} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)}{k \cdot (R_1 + R_2)}$$

Количество заряда в 1-сфере

$$q_1' = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (q_1 + q_2) = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \left( \frac{\varphi_1 R_1}{k} + \frac{\varphi_2 R_2}{k} \right) = \frac{R_1 \cdot (\varphi_1 \cdot R_1 + \varphi_2 \cdot R_2)}{k \cdot (R_1 + R_2)}$$

Количество заряда в 2-сфере

$$q_2' = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (q_1 + q_2) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left( \frac{\varphi_1 R_1}{k} + \frac{\varphi_2 R_2}{k} \right) = \frac{R_2 \cdot (\varphi_1 \cdot R_1 + \varphi_2 \cdot R_2)}{k \cdot (R_1 + R_2)}$$

Результирующий потенциал  $\varphi'$  имеет вид:

$$\varphi' = k \frac{q_1 + q_2}{R_1 + R_2} = k \frac{\frac{\varphi_1 R_1}{k} + \frac{\varphi_2 R_2}{k}}{R_1 + R_2} = \frac{\varphi_1 \cdot R_1 + \varphi_2 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Таким образом, если потенциал сферы радиусом  $R_1$  равен  $\varphi_1$ , а потенциал сферы радиусом  $R_2$  равен  $\varphi_2$  ( $\varphi_1 < \varphi_2$ ), то количество заряда, протекающего от

сферы 1 к сфере 2 при касании этих сфер, равно  $\Delta q$ , заряды, образующиеся в каждой сфере  $q_1', q_2'$ , результирующий потенциал, определяемый  $\varphi'$  он будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta q = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)}{k \cdot (R_1 + R_2)}, \quad q_1' = \frac{R_1 \cdot (\varphi_1 \cdot R_1 + \varphi_2 \cdot R_2)}{k \cdot (R_1 + R_2)}, \quad q_2' = \frac{R_2 \cdot (\varphi_1 \cdot R_1 + \varphi_2 \cdot R_2)}{k \cdot (R_1 + R_2)},$$

$$\varphi' = \frac{\varphi_1 \cdot R_1 + \varphi_2 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (7.15)$$

Как видно из приведенной выше формулы  $R_1=R_2=R$ , потенциал определяется из формулы:

$$\varphi' = \frac{\varphi_1 \cdot R_1 + \varphi_2 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{\varphi_1 \cdot R + \varphi_2 \cdot R}{2R} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$$

4. Давайте определим потенциал, который будет равен при соприкосновении шаров с равными радиусами. Следовательно, если соприкоснутся двух сфер с потенциалами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , радиусы которых равны, результирующий потенциал, который мы решим, будет их средней арифметическим.

$$\varphi' = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \quad (7.16)$$

5. Давайте определим потенциал, который будет равен, когда шарика с разными зарядами будут касаться. Используя приведенную выше формулу, мы получим, что  $q_1=q_2$ . Там будет результирующий потенциал.

$$\varphi' = \frac{\varphi_1 \cdot R_1 + \varphi_2 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{\varphi_1 \cdot k \frac{q_1}{R_1} + \varphi_2 \cdot k \frac{q_2}{R_2}}{k \frac{q_1}{R_1} + k \frac{q_2}{R_2}} = \frac{k (q_1 + q_2)}{k \left( \frac{q_1 + q_2}{\varphi_1} \right)} = \frac{2q}{\varphi_1 + \varphi_2}$$

Следовательно, оказывается, что если две сферы, имеющие потенциалы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  и равные заряды, будут касаться друг друга, результирующий потенциал, который будет равен, будет их средней гармоникой.

$$\varphi' = \frac{2\varphi_1 \varphi_2}{\varphi_1 + \varphi_2} \quad (7.17)$$

6. Давайте определим, каким будет потенциал, когда несколько капель с одинаковыми размерами и потенциалами образуют одну большую каплю путем слияния нескольких капель с одинаковым зарядом. От потенциала маленькой капли  $\varphi_0 = k \frac{q_0}{R_0}$  находится ее заряд  $q_0 = \frac{\varphi_0 R_0}{k}$ . При этом объем

$V = N V_0$  результирующего заряда  $q = N q_0 = N \frac{\varphi_0 R_0}{k}$ , большой каплю, образующейся от слияния  $N$  таких капель, будет  $V = N V_0$ . Радиус большой капли имеет вид.



$$V = N\varphi_0, \rightarrow \frac{4}{3}\pi R^3 = N \frac{4}{3}\pi R^3, \rightarrow R = \sqrt[3]{N R_0}$$

Результатирующий потенциал имеет вид:

$$\varphi = k \frac{q}{R} = k \frac{N \frac{4}{3}\pi R_0^3}{\sqrt[3]{N R_0}} = \sqrt[3]{N^2} \varphi_0$$

Таким образом, результирующий потенциал большой капли, образованной присоединением  $N$  одинаковых капель, потенциал которых равен  $\varphi_0$  заряженной малой капли  $\varphi_{рез}$  будет равен:

$$\varphi_{рез} = \sqrt[3]{N^2} \cdot \varphi_0 \quad (7.18)$$

6. Если заряды имеют разный знак, то на линии, соединяющей эти заряды, есть 2 точки, в которых результирующий потенциал, создаваемый зарядами в этих точках, равен нулю. Модуль этих точек близок к малому заряду, причем одна из точек лежит между зарядами, а другая — снаружи. Определим расстояния этих точек от зарядов (рис. 7.18).

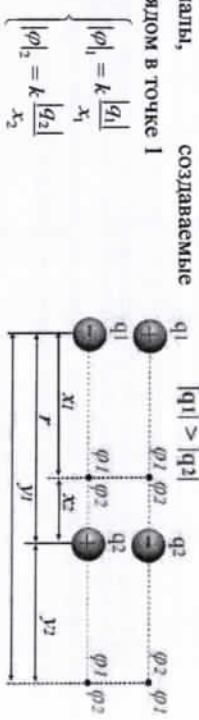


Рисунок 7.18

Потенциалы, создаваемые каждым зарядом в точке 1

$$\begin{cases} |\varphi_1| = k \frac{|q_1|}{x_1} \\ |\varphi_2| = k \frac{|q_2|}{x_2} \end{cases}$$

$$x_2 = r - x_1 = r - \frac{|q_1|}{|q_1| + |q_2|} r = \frac{|q_2|}{|q_1| + |q_2|} r$$

В точке 2 потенциалы, создаваемые каждым зарядом будут:

$$\begin{cases} |\varphi_1| = k \frac{|q_1|}{x_1} \\ |\varphi_2| = k \frac{|q_2|}{x_2} \end{cases}$$

Так как потенциалы равны по величине  $|\varphi_1| = |\varphi_2|$  будет как:

$$\begin{aligned} k \frac{|q_1|}{x_1} = k \frac{|q_2|}{x_2} &\rightarrow \frac{|q_1|}{x_1} = \frac{|q_2|}{x_2} \rightarrow |q_1| x_2 = |q_2| x_1 \rightarrow x_1 = \frac{|q_1|}{|q_1| - |q_2|} r \\ x_2 = x_1 - r = \frac{|q_1|}{|q_1| - |q_2|} r - r = \frac{|q_2|}{|q_1| - |q_2|} r \end{aligned}$$

Тем же образом, если  $q_1$  и  $q_2$  заряды имеют разный знак, то расстояния от каждого заряда точек, в которых результирующий потенциал будет равен нулю, будут следующими:

$$\begin{cases} x_1 = \frac{|q_1|}{|q_1| + |q_2|} \cdot r \\ x_2 = \frac{|q_2|}{|q_1| + |q_2|} \cdot r \end{cases} \quad \text{и} \quad \begin{cases} x_1 = \frac{|q_1|}{|q_1| - |q_2|} \cdot r \\ x_2 = \frac{|q_2|}{|q_1| - |q_2|} \cdot r \end{cases} \quad (7.19)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  (у1 и у2) — расстояния от внутренней (внешней) точки до зарядов, при которых результирующий потенциал будет равен нулю.

**Вопросы по теме:**

1. Чем равен потенциал внутри поверхности заряженной сферы?
2. Чем равен потенциал на поверхности поверхности заряженной сферы?
3. Чем равен потенциал внутри объема заряженного шара?
4. Чем равен потенциал на поверхности объема заряженного шара?
5. Чем равен потенциал вне заряженной сферы?
6. Нарисуйте графики зависимости потенциалов от расстояния для отрицательных и положительной поверхности заряженных сфер.
7. В каком месте заряженного проводящего шарика заряд сосредоточен больше всего?
8. Чем равен потенциал на заряженной кольцевой оси? В какой момент потенциал будет наибольшим?
9. Чем равен потенциал на оси заряженного диска? В какой момент потенциал будет наибольшим?
10. Напишите формулы для энергии заряженного шара.
11. Что такое эквипотенциальные поверхности? Приведите примеры для эквипотенциальных поверхностей. Какова связь между напряженностью поля и эквипотенциальными поверхностями?
12. Напишите формулы количества заряда, пролетающего при столкновении сфер с разными зарядами и размерами, зарядов, образующихся в каждой сфере, и результирующего потенциала.
13. Напишите формулы количества заряда, пролетающего при столкновении сфер с разными потенциалами и размерами, зарядов, образующихся в каждой сфере, и решенных потенциалов.
14. Какой будет потенциал, который будет, когда шарика с равными радиусами или с равными зарядами будут в соприкосновении?

**Решение задач:**

1. Заряд  $5 \cdot 10^{-6}$  Кл в точке электростатического поля имеет потенциальную энергию  $5 \cdot 10^{-6}$  Дж. Найдите потенциал поля в этой точке (В).  
A) 1000 B) 100 C) 10 D) 1

**Дано:**  
 $W = 5 \cdot 10^{-6}$  Дж  
 $q = 10^{-5}$  Кл  
 $\varphi = ?$

**Решение:**  
 Воспользуемся следующей формулой:  

$$\varphi = \frac{W}{q} = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-6}} = 1 \text{ В}$$

**Ответ:** D) 1 В

2. 8 капель ртути с зарядом  $10^{-12}$  Кл и радиусами от 1 мм соединились и образовалась одна капля. Сколько вольт имеет большей потенциал падения?

**Дано:**  
 $N = 8$   
 $q = -12 \text{ Кл}$   
 $r = 10^{-3}$  м  
 $\varphi = ?$

**Решение:**  
 Общий потенциал равен сумме потенциалов.  

$$\varphi_0 = k \frac{q}{r^2} \text{ и } \varphi = \frac{\varphi_0 N}{\sqrt[3]{N}}$$

$$\varphi_0 = k \frac{q}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{10^{-12}}{10^{-3}} = 9 \text{ В}$$

$$\varphi = \frac{\varphi_0 N}{\sqrt[3]{N}} = \frac{9 \cdot 8}{2} = 36 \text{ В}$$

**Ответ:** 36 В

3. Сколько вольт будут иметь потенциалы шаров после того, как шар с радиусом 5 см и зарядом до потенциала 100 В будет соединен проволокой с незаряженным шаром радиусом 3 см?

**Дано:**  
 $R = 5 \text{ см}$   
 $U = 100 \text{ В}$   
 $r = 3 \text{ см}$   
 $\varphi = ?$

**Решение:**  
 Воспользуемся следующей формулой:  

$$\varphi = \frac{\varphi_0 R_1}{R_1 + r}$$

$$\varphi = \frac{\varphi_0 R_1}{R_1 + r} = \frac{100 \cdot 5}{8} = 62,5 \text{ В}$$

**Ответ:** 62,5 В

**§ 8. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ. КОНДЕНСАТОРЫ И ИХ ВИДЫ. ЭНЕРГИЯ КОНДЕНСАТОРА. ПЛОТНОСТЬ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ.**

**Электрическая емкость изолированного проводника, взаимная электрическая емкость, конденсатор:**

Все точки на поверхности заряженного проводника имеют одинаковый потенциал, т. е. его поверхность состоит из эквипотенциальной поверхности, потенциал которой зависит от заряда. Поэтому вопрос определения потенциала проводника, зная его заряд, и, наоборот, его заряда, исходя из

потенциала проводника, является очень важным вопросом. Для решения этого вопроса вводится новое понятие физической величины, которая называется электрической емкостью. Остановимся в первую очередь на электрической емкости изолированного проводника. Изолированный проводник относится к проводнику, который электрически изолирован и находится на достаточном расстоянии от других проводников. Если изолированному проводнику дать заряд  $q$ , то этот заряд будет распространяться по поверхности проводника до тех пор, пока поверхность проводника не станет эквипотенциальной поверхностью с некоторым потенциалом  $\varphi$ . Так как потенциал поверхности проводника  $\varphi$  изменяется пропорционально даваемому ему заряду  $q$ . В результате измерений выяснилось, что отношение заряда проводника к потенциалу, т. е.  $\frac{q}{\varphi}$ , независимости от величины и величины заряда, будет зависеть только от размеров, формы проводника и свойств диэлектрика вокруг проводника. Это отношение называется электрической емкостью изолированного проводника и обозначается буквой  $C$ .

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad (8.1)$$

Исходя из приведенного выше выражения, электрическая емкость может быть определена так:

электрической емкостью изолированного проводника называют физическую величину, количество равно заряду, необходимому для изменения его потенциала на единицу. Электрическая емкость измеряется в фарадах ( $\varphi$ ). Когда к изолированному проводнику прикладывается заряд  $1 \text{ Кл}$ , он имеет потенциал  $1 \text{ В}$ , электрическая емкость этого проводника равна  $1 \varphi$ .

$$1 \varphi = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}} \quad (8.2)$$

Почему электрический заряд  $1 \text{ Кл}$  является огромным зарядом, электрическая емкость  $1 \varphi$  также является огромной емкостью. На практике линия работа вообще не сводится к  $1 \varphi$  электрической емкости. Поэтому мы видим, что доли этой емкости в выпущках работают в микрофарадах ( $\mu\text{Ф}$ ), пикофарадах ( $\text{пФ}$ ), нанофарадах ( $\text{нФ}$ ). Например, электрическая емкость изолированной проводящей сферы радиусом  $R = 9 \cdot 10^6 \text{ см}$  будет равна  $1 \varphi$ . Этот размер примерно в 19 раз больше расстояния от Земли до Луны. Электрическая емкость проводящей сферы, радиус которой такой же, как у Земли, будет примерно равна  $700 \text{ мкФ}$ . Выше мы видели, что даже если емкость изолированных от влияния других проводников проводников очень

мала, их размер будет очень большим. Из-за того, что такие проводники вообще нельзя использовать в технике в качестве электрической емкости, создаются малогабаритные электрические емкости. Если проводник не изолирован, то есть рядом с ним находятся другие проводники, его электрическая емкость будет намного больше, чем в изолированном состоянии.

Это связано с тем, что на ближайших поверхностях проводников вокруг проводника  $A$  с зарядом  $q$  образуются индуцированные током противоположные заряды  $q$  с заряды, которые также уменьшают потенциал проводника  $A$  на его месте и увеличивают его электрическую емкость. Емкость, создаваемая системой проводников, называется взаимной емкостью. На практике наибольшая электрическая емкость создается с помощью системы проводников, промежутики между которыми разделены диэлектриком и заряжены противоположно направленными зарядами.

Если вычитание потенциалов (напряжений) между системой проводников, заряженных зарядами  $+q$  и  $-q$ , равно  $U = \phi_1 - \phi_2$ , взаимная электрическая емкость этих двух проводников  $C$  будет равна:

$$C = \frac{q}{\phi_1 - \phi_2} = \frac{q}{U} \quad (8.3)$$

Исходя из приведенного выше выражения, электрическая емкость может быть определена так: взаимной электрической емкостью двух проводников называют величину, количественно равную заряду, переносимому от одного проводника к другому с целью изменения разности потенциалов между ними на единицу. Электрическая емкость  $C$  также может быть определена следующим образом. Когда между двумя проводниками образуется разность потенциалов  $U$ , в каждом проводнике образуется заряд  $+Kq$  и  $-Kq$ , взаимная электрическая емкость этих проводников будет равна  $C$ .

$$C = \frac{Kq}{U} \quad (8.4)$$

Система проводников, предназначенных для накопления в себе заряда, называется конденсатором. А проводники называются конденсаторными обложками. Конденсатор происходит от латинского слова "конденсат", что означает накопить, заставить. Конденсатор — это устройство, которое накапливает и долго хранит заряд, который ему дан. Заряд накапливается в

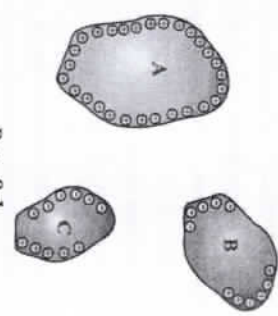


Рис. 8.1

обложках конденсатора, в то время как энергия электрического поля накапливается в пространстве между обложками. Познакомимся с различными типами конденсаторов, накапливающих заряды, их электрической емкостью и энергией. Электрическая емкость различных конденсаторов: Существуют следующие типы конденсаторов:

- 1) плоский конденсатор;
- 2) сферический конденсатор;
- 3) сжатый шар;
- 4) цилиндрический конденсатор.

Из этих конденсаторов, с которыми мы чаще всего сталкиваемся в промышленности это плоский конденсатор. Две параллельные проводящие пластины, расположенные близко друг к другу, разделенные диэлектриком, являются противоположно направленными зарядами, называются плоскими конденсаторами. Когда плоский конденсатор заряжен, внешняя сторона каждой обложки электронейтральна, и на внутренних поверхностях этих обложек, обращенных друг к другу, накапливается противоположное и одинаковое количество зарядов  $+q$  и  $-q$  соответственно. Между обложками образуется однородное электрическое поле (рис. 8.2).

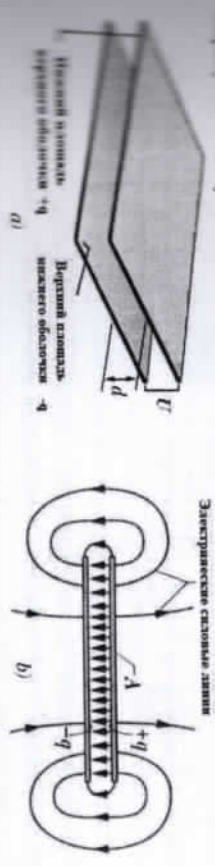


Рисунок 8.2

Ниже на рисунке представлена схема подключения плоского конденсатора к источнику постоянного тока и схематическое изображение.

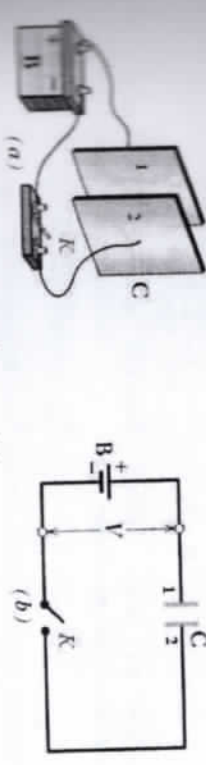


Рисунок 8.3

Наша формула расчета электрической емкости плоского конденсатора. Воспользуемся общей формулой емкости для конденсаторов.

$$C = \frac{q}{U} = \frac{q}{Ed} = \frac{q}{\frac{\sigma}{\epsilon \epsilon_0} d} = \frac{q}{\frac{q}{S \epsilon \epsilon_0} d} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$

Следовательно, электрическая емкость плоского конденсатора будет:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} \quad (8.5)$$

Где:  $S$  – площадь одного обложечек,  $d$  – расстояние между обложечками. Два взаимно перпендикулярных сферических проводника, заряженных противоположно направленными зарядами, называются сферическими конденсаторами. Заряды накапливаются на обращенных друг к другу поверхностях обложечек, а энергия электрического поля – в пространстве между обложечками. Выведем формулу расчета электрической емкости сферического конденсатора. При этом в каждом сферическом покрытии накапливается одинаковое количество и противоположно направленных зарядов.

Интеграл формулы напряженности электрического поля через определим разность потенциалов в пространстве между воздушными шарами.

$$E = -\frac{d\varphi}{dr}, \rightarrow d\varphi = -E dr = -k \frac{q}{r^2} dr, \rightarrow$$

$$U = \Delta\varphi = \varphi_R - \varphi_r = \int_r^R d\varphi = \int_r^R -k \frac{q}{r^2} dr = k \frac{q}{r} \Big|_r^R =$$

$$= k \frac{q}{R} - k \frac{q}{r} = kq \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right)$$

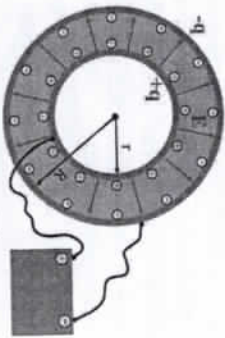


Рисунок 8.4

В полученной выше формуле вычитание в скобках получается отрицательным. Это означает, что потенциал сферы с радиусом  $r$  на величину больше, чем потенциал сферы с радиусом  $R$ . А нам нужна формула, по которой получается положительное значение. Следовательно, формула напряженности

$$U = \varphi_r - \varphi_R = kq \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right)$$

записываем по виду. Теперь формула электрической емкости для сферического цилиндра имеет вид:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{1}{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} q \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right)} = \frac{4\pi\epsilon_0 Rr}{R-r}$$

Следовательно, электрическая емкость сферического конденсатора имеет

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0 Rr}{R-r} \quad (8.6)$$

Если в сферическом конденсаторе расстояние  $R-r=d$  между обложечками относительно меньше размеров сфер, то есть  $d \ll r \approx R$ , то между обложечками образуется однородное электрическое поле. Такой конденсатор становится почти плоским конденсатором. Потому что формула для расчета электрической емкости

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0 Rr}{R-r} \approx \frac{4\pi r^2 \epsilon \epsilon_0}{d} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$

это будет так же, как в плоском конденсаторе.

Если сферический конденсатор имеет  $R \approx r$ , такой конденсатор называется неоднородным шаром. Поскольку это  $R \approx r$ , мы считаем, что  $\frac{1}{R} \approx 0$ . И так получается результат.

Отсюда следует, что электрическая емкость изолированной сферы определяется по формуле (рис. 8.5):

$$C = 4\pi\epsilon_0 r^2 \quad (8.7)$$

Нормально координатные два цилиндрического проводника, заряженные противоположно направленными зарядами, называются цилиндрическими конденсаторами. Заряды накапливаются на обращенных друг к другу поверхностях покрытий, а энергия электрического поля в пространстве между обложечками. Мы считаем, что длина цилиндра намного больше, чем его радиус, то есть  $L \gg R$ . Выведем формулу расчета электрической емкости цилиндрического конденсатора. При этом поле, образованное цилиндром, находится по формуле, ранее рассчитанной для бесконечно длинной нити, заряженной в пункте 4.

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 r} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r L}$$

А потенциал в произвольной точке

$$d\varphi = E dr = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 L} \frac{dr}{r}$$

получается по формуле. Интегрируя это с  $r$  на  $R$ , мы получаем напряжение между цилиндрическими обложечками, т. е. будет:

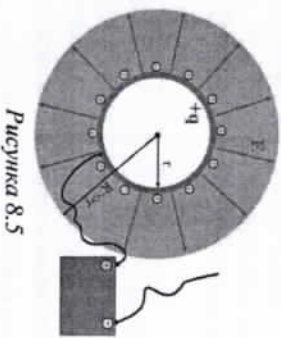


Рисунок 8.5

$$U = \int d\varphi = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 L} \int_r^R \frac{dr}{r} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 L} \ln\left(\frac{R}{r}\right)$$

Теперь для емкости это:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{q}{\frac{q}{2\pi\epsilon_0 L} \ln\left(\frac{R}{r}\right)} = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

Следовательно, электрическая емкость цилиндрического конденсатора будет равна (рис. 8.6):

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad (8.8)$$

Если расстояние между цилиндрами  $d=R-r$  слишком мало, чем их радиус, то есть  $d \ll r \approx R$ , между оболочками образуется однородное электрическое поле. Такой конденсатор становится плоским конденсатором. Потому что в формуле:

$$\ln\left(\frac{R}{r}\right) = \ln\left(1 + \frac{d}{r}\right) \approx \frac{d}{r}$$

учитывая, что это:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{d/r} = \frac{\epsilon_0 2\pi r L}{d} = \frac{\epsilon_0 S}{d}$$

из формулы, полученной для емкости плоского конденсатора.

*Энергия конденсатора, плотность энергии, поперечные силы:*

При подаче на него элементарного заряда  $dq$  в процессе зарядки конденсатора электрические силы выполняют элементарную работу  $dA = Udq = C U dq$ . Если мы интегрируем это от 0 до  $U$  то это общая работа, выполненная в процессе зарядки конденсатора, то есть энергия, получаемая конденсатором электрическим полем равен:

$$A = \int dA = C U \int_0^U du = \frac{C U^2}{2} = W$$

Другими словами, заряд и напряжение связаны так как поверхность, ограниченная графиком на графике, дает работу, выполняемую при зарядке конденсатора (рис.8.7).

В общем случае получается, что энергия конденсатора может принимать следующие три вида.

$$W = \frac{1}{2} q U = \frac{C U^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

(8.9)

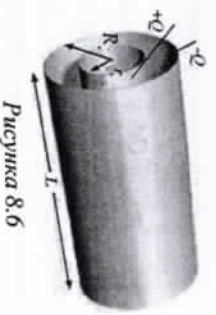
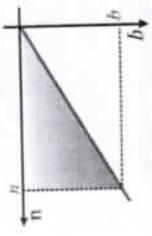


Рисунок 8.6

Поскольку при решении задач мы часто сталкиваемся с плоским конденсатором, из трех приведенных выше формул можно составить еще три формулы для плоского конденсатора. При этом, получается формула:

$$1) W = \frac{C U^2}{2} = \frac{\epsilon_0 S E^2 d^2}{2d} = \frac{\epsilon_0 E^2 S d}{2}; \quad 2) W = \frac{C U^2}{2} = \frac{\epsilon_0 S U^2}{2d}$$

$$3) W = \frac{q^2}{2C} = \frac{(\sigma S)^2}{2 \epsilon_0 S} = \frac{\sigma^2 S d}{2 \epsilon_0}$$

Важно отметить, получается, что энергию плоского конденсатора можно определить по следующим трем формулам:

$$W = \frac{\epsilon_0 E^2 S d}{2} = \frac{\epsilon_0 S U^2}{2d} = \frac{\sigma^2 S d}{2 \epsilon_0} \quad (8.10)$$

Энергия электрического поля, приходящаяся на единицу объема, называется плотностью энергии. Плотность энергии определяется по формуле:

$$w = \frac{W}{V} \quad (8.11)$$

Его единица измерения равна  $\left[\frac{Дж}{м^3}\right]$ .

В частном случае плоское электрическое поле конденсатора плотность энергии может быть представлена в следующих трех видах:

$$w = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} = \frac{\epsilon_0 U^2}{2d^2} = \frac{\sigma^2}{2 \epsilon_0} \quad (8.12)$$

Заряды с разными знаками притягиваются друг к другу в соответствии с законом Кулона. В результате гравитации расстояние между оболочками уменьшается максимально сократиться. Такую механическую силу, возникающую между заряженными макроскопическими телами, называют поперечной силой. Согласно формуле, выражающей связь между потенциальной энергией и силой в общем случае, поперечная сила будет:

$$W = \vec{F} \cdot \vec{r} = -F r \quad (8.13)$$

$$F = -\frac{W}{r}$$

Где (-) обозначает взаимодействие оболочек, W-энергию конденсатора. В частном случае можно формулировать еще три формулы, определяющие поперечную силу для плоского конденсатора. В частном случае можно формулировать еще три формулы, определяющие поперечную силу для плоского конденсатора.

Рисунок 8.7

$$F = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2 S}{2} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U^2}{2d^2} = \frac{\sigma^2 S}{2\epsilon \epsilon_0} \quad (8.14)$$

Величина ponderомоторных сил сравнительно невелика, что делает ее более трудной для восприятия. Например, оболочка конденсатора, подогнанные к напряжению  $U=100$  В, с поверхностью  $S=100$  см<sup>2</sup> и расстоянием между оболочками  $d=1$  мм, притягиваются друг к другу с притягивательной силой  $F \approx 0,443$  мН.

Вопросы по теме:

1. Что такое изолированный проводник? Что называется электрической емкостью изолированного проводника?
2. Что такое электрический проводник? Какова его формула электрической емкости? В чем преимущество перекрестного проводника перед изолированным?
3. Что называется конденсатором? Какие бывают виды конденсаторов?
4. В каком месте конденсатора накапливается заряд и энергия?
5. Напишите формулы электрической емкости для разных конденсаторов. Если возможно, приведите.
6. При выполнении какого условия сферический и цилиндрический конденсаторы преобразуются в плоский конденсатор?
7. Запишите формулы для энергии конденсатора в общем виде.
8. Запишите формулы для энергии плоского конденсатора в частном порядке.
9. Что называется плотностью энергии? По каким формулам определяется плотность энергии в плоском конденсаторе?
10. Что называют ponderомоторными силами? Запишите формулы взаимного притяжения плоских конденсаторных покрытий.

### Решение задачи:

1. На одну пластину плоского конденсатора подается заряд  $+0,2$  К, на вторую  $-0,2$  Кл. Напряжение между пластинами 5 кВ. Какова емкость конденсатора (мкФ)?

- A) 80 В) 40 С) 25 Д) 10

Дано:

$$U = 5 \text{ кВ}$$

$$q_1 = +0,2 \text{ С}$$

$$q_2 = -0,2 \text{ С}$$

$$C = ?$$

Решение: Используем формулу электрической емкости:

$$C = \frac{q}{U}$$

$$C = \frac{q}{U} = \frac{0,2}{5 \cdot 10^3} = 40 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

Ответ: B) 40.

4. Электрическая емкость сферы радиусом в скольких метрах будет равна 1 Ф в вакууме?

- A)  $1 \cdot 10^7$  В)  $1 \cdot 10^8$  С)  $9 \cdot 10^{10}$  Д)  $9 \cdot 10^9$

Дано:

$$\epsilon = 1$$

$$C = 1 \text{ Ф}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$$

$$R = ?$$

Решение: Используем формулу изолированной электрической емкости сферы:

$$C = 4\pi\epsilon_0 \epsilon R$$

$$R = \frac{C}{4\pi\epsilon_0 \epsilon}$$

$$R = \frac{C}{4\pi\epsilon_0 \epsilon} = 9 \cdot 10^9 \text{ м}$$

ответ: D)  $9 \cdot 10^9$ .

4. Плотность каждого плоского конденсатора равна  $S$ , а расстояние между ними равно  $l$ . Металлическая пластина толщиной  $d$  вставляется в конденсатор, не касаясь оболочек. Какова емкость конденсатора?

Дано:

$$N, l, d$$

Решение:

Конденсатор в данном случае можно рассматривать как два последовательно соединенных конденсатора.

Используем следующую формулу:

$$C_n = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{C}{2} = \frac{\epsilon_0 S}{2(l-d)} = \frac{\epsilon_0 S}{2l-d}$$

$$\text{ответ: } \frac{\epsilon_0 S}{2l-d}$$

### 9. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ПОДКЛЮЧЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ. ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ ДЛЯ КОНДЕНСАТОРА

Несовместимые и параллельные подключения конденсаторов:

Соединение конденсаторов, как на рисунке ниже, является последовательным соединением. При этом последовательно соединяют 1-ю обкладку конденсатора 1 с 2-й обкладкой конденсатора 2, 2-ю обкладку конденсатора 2 с 3-й обкладкой конденсатора 1 и так далее (рис. 9.1).

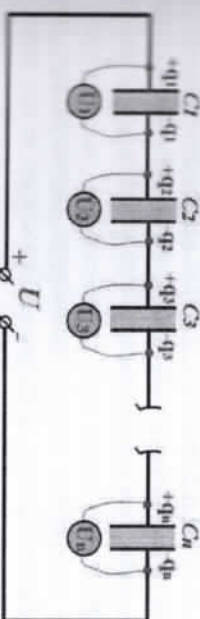


Рисунок 9.1

При последовательном соединении конденсаторов 1-я обкладка конденсатора 1 подключается к (+) полюсу источника, а 2-я обложка последнего n-го конденсатора подключается к (-) полюсу источника.

Вполне естественно, что возникает вопрос о том, как будет заряжаться промежуточное покрытие и конденсаторы, если они не подключены ни к одному источнику. Причиной этого является явление электростатической индукции. Поскольку здесь промежуточное покрытие и конденсаторы находятся в электрическом поле двух крайних покрытий, подключенных к источнику, они действуют как проводники, включенные в электрическое поле. На противоположных сторонах каждого проводника (соседних обложках конденсатора, соединенных между собой) скапливается одинаковое количество и противоположно направленных зарядов. В результате каждая обложка конденсаторов, которые вы последовательно подключаете к источнику тока, будет иметь одинаковое количество зарядов +q и -q соответственно. Поэтому суммарный заряд рассчитывается по формуле:

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

Это потому, что общее напряжение, подаваемое из наруже, распределяется по всем конденсаторам.

$$U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$$

И общая емкость будет в этом представляении.

$$U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n; \rightarrow \frac{q}{C} = \frac{q_1}{C_1} + \frac{q_2}{C_2} + \frac{q_3}{C_3} + \dots + \frac{q_n}{C_n}; /: q \rightarrow$$

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

Таким образом, получается, что при последовательном соединении конденсаторов общий заряд, общее напряжение и общая емкость будут (рис. 9.1):

$$\begin{aligned} q_{\text{общ}} &= q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_n \\ U_{\text{общ}} &= U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n \\ \frac{1}{C_{\text{общ}}} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \end{aligned} \quad (9.1)$$

Общая емкость, образуемая при последовательном соединении конденсаторов, будет еще меньше наименьшей емкости в пределах заданной емкости конденсатора.

Определим суммарную емкость одинаковых конденсаторов. Поскольку все заданные емкости равны, то получаем, что каждая из них равна. Общая емкость будет:

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \dots + \frac{1}{C} = \frac{n}{C} \rightarrow C_{\text{общ}} = \frac{C}{n}$$

Следовательно, если n одинаковых конденсаторов подключены последовательно, общая емкость будет равна:

$$C_{\text{общ}} = \frac{C}{n} \quad (9.2)$$

Теперь определим суммарную емкость двух последовательно соединенных конденсаторов. На этом и получается результат:

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

Таким образом, если конденсаторы с емкостями  $C_1$  и  $C_2$  подключены последовательно, общая емкость будет равна:

$$C_{\text{общ}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (9.3)$$

Соединение конденсаторов, как показано на рисунке 9.2 ниже, является параллельным соединением. При этом покрытие 1 всех конденсаторов подключается к (+) полюсу источника, а покрытие 2-к (-) полюсу источника.

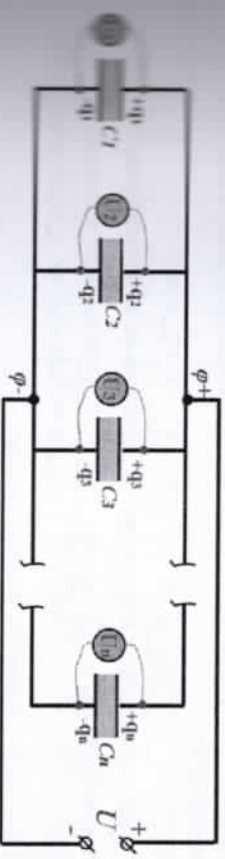


Рисунок 9.2

Нарядные обкладки 1 всех конденсаторов подключены непосредственно к (+) полюсу источника. Следовательно, на всех этих покрытиях образуется потенциал  $\varphi^+$ , равный потенциалу полюса (+) одного и того же источника.

Нижние обкладки 2 всех конденсаторов подключены непосредственно к (-) полюсу источника. Следовательно, на всех этих обкладках образуется потенциал, равный потенциалу полюса (-) одного и того же источника (рис. 9.2). Разность потенциалов в каждом обкладке будет равна между собой, и эта разность потенциалов будет равна напряжению источника, то есть  $\varphi^+ - \varphi^- = U$ . Следовательно, напряжения на всех конденсаторах одинаковы и равны напряжению источника, будут, т. е.:

$$U_{\text{общ}} = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n$$

Поскольку каждый из конденсаторов в процессе зарядки получает заряд от источника тока, то суммарный заряд системы конденсаторов равен сумме зарядов, накопленных во всех конденсаторах, т. е.

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

Общая емкость системы конденсаторов имеет следующий вид:

$$q_{\text{общ}} = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n; \rightarrow C_{\text{общ}} U_{\text{общ}} = C_1 U_1 + C_2 U_2 + C_3 U_3 + \dots + C_n U_n; C \rightarrow \rightarrow C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$$

Таким образом, получается, что при параллельном соединении конденсаторов общий заряд, общее напряжение и общая емкость имеет следующий вид (рис. 9.2):

$$\begin{cases} q_{\text{общ}} = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n \\ U_{\text{общ}} = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n \\ C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \end{cases} \quad (9.4)$$

Общая емкость, которая образуется при параллельном соединении конденсаторов, будет даже больше, чем наибольшее сопротивление в данной емкости конденсатора.

Когда все заданные емкости равны, что каждая из них равна  $C$ . Общая емкость будет:

$$C_{\text{общ}} = C + C + C + \dots + C, \rightarrow C_{\text{общ}} = nC$$

Если параллельно подключить  $n$  одинаковых конденсаторов, то общая емкость составит:

$$C_{\text{общ}} = nC \quad (9.5)$$

**Частные случаи для конденсатора:**

Все приведенные ниже формулы являются частными случаями, которые очень удобны для облегчения вычислительной работы при решении задач. Нумеруем формулы, чтобы не перепутать между собой.

**Л.** Определим падение напряжения на каждом из последовательно соединенных различных конденсаторов. Общая емкость двух последовательно соединенных конденсаторов, в которых заряды равны  $q_{\text{общ}} = q_1 = q_2$ .

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

Напряжения на каждом конденсаторе будут равны

$$U_1 = \frac{q_{\text{общ}}}{C_1} = \frac{C_2 U_{\text{общ}}}{C_1} \quad U_2 = \frac{q_{\text{общ}}}{C_2} = \frac{C_1 U_{\text{общ}}}{C_2}$$

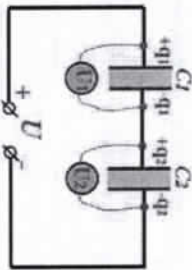


Рисунок 9.3

Таким образом, при последовательном подключении конденсаторов емкостями  $C_1$  и  $C_2$  к источнику напряжения  $U$  получается, что напряжения  $U_1$  и  $U_2$  возникают на каждом конденсаторе, имеет следующий вид: (рис. 9.3)

$$U_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \cdot U, \quad U_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot U \quad (9.6)$$

Из приведенной выше формулы видно, что при последовательном соединении конденсаторов суммарное напряжение распределяется на конденсаторы в обратной пропорции. Другими словами, чем меньше напряжение на конденсаторе больше емкости, то есть  $U_1 = \frac{C_2}{C_1}$ .

**Л.** Определим величины зарядов в каждом из параллельно соединенных конденсаторов.

Зная  $U_{\text{общ}} = U_1 = U_2$  и  $C = \frac{q}{U}$  используя

$$q_1 = C_1 U_1 = C_1 U_{\text{общ}} \quad \text{и} \quad q_2 = C_2 U_2 = C_2 U_{\text{общ}}$$

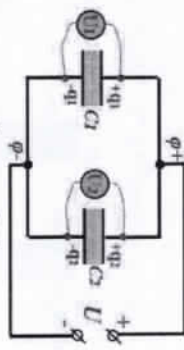


Рисунок 9.4

Следовательно, при параллельном подключении конденсаторов емкостями  $C_1$  и  $C_2$  к источнику напряжения  $U$  получается, что заряды  $q_1$  и  $q_2$  определяются в каждом конденсаторе, будут следующими (рис. 9.4):

$$q_1 = C_1 \cdot U, \quad q_2 = C_2 \cdot U \quad (9.7)$$

Из приведенной выше формулы видно, что чем больше заряд первоначально в конденсаторе, тем больше будет емкость, то есть  $\frac{q_1}{C_1} = \frac{q_2}{C_2}$ .

**Л.** Для конденсатора, заряд и емкость которых известны, откроем от источника тока, а затем определим величины зарядов в каждом из них при соединении друг с другом, величины протекающих зарядов и определяемое напряжение. (рис. 9.4).





Рисунок 9.4

Когда два конденсатора заряжены и соединены друг с другом параллельно, общая емкость равна  $S = C_1 + C_2$ . Согласно закону сохранения зарядов, сумма начальных зарядов в конденсаторах будет равна  $q_{\text{общ}} = q_1 + q_2$  сумма зарядов, образующихся после их подключения  $q'_{\text{общ}} = q'_1 + q'_2$ , т. е.  $q_1 + q_2 = q'_1 + q'_2$  будет. Заряд течет от конденсатора большего напряжения к конденсатору малого напряжения, и обменный ток зарядов в них продолжается до тех пор, пока их напряжение не станет равным  $U' = U'_1 = U'_2$ . Теперь заряды, возникающие каждым конденсатором, могут быть найдены:

$$q'_1 = C_1 U' = C_1 \frac{q'_{\text{общ}}}{C_1 + C_2} = C_1 \frac{q_1 + q_2}{C_1 + C_2}$$

$$q'_2 = C_2 U' = C_2 \frac{q'_{\text{общ}}}{C_1 + C_2} = C_2 \frac{q_1 + q_2}{C_1 + C_2}$$

А сумма протекающего заряда будет равна разности начального и конечного зарядов.

$$\Delta q = q_1 - q'_1 = q_1 - \frac{C_1}{C_1 + C_2} (q_1 + q_2) = \frac{q_1 C_2 - q_2 C_1}{C_1 + C_2}$$

Определяемое напряжение будет равно отношению общего заряда к общей емкости

$$U' = \frac{q_{\text{общ}}}{C_{\text{общ}}} = \frac{q_1 + q_2}{C_1 + C_2}$$

Таким образом, при отключении от источника конденсаторов емкости  $C_1$  и  $C_2$  заряженных до зарядов  $q_1$  и  $q_2$ , и их параллельном соединении заряды ( $q'_1$  и  $q'_2$ ) в каждом конденсаторе, количество протекающего заряда  $\Delta q$  и определяемое напряжение  $U'$  оказываются следующими (рис. 9.4):

$$\boxed{q'_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} (q_1 + q_2), \quad q'_2 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} (q_1 + q_2), \quad \Delta q = \frac{q_1 C_2 - q_2 C_1}{C_1 + C_2}, \quad U' = \frac{q_1 + q_2}{C_1 + C_2}} \quad (9.8)$$

4. Отсоединив от источника тока два конденсатора, напряжение и емкость которых известны, а затем соединив их друг с другом, определим величины зарядов в каждом из них, величины протекающих зарядов и определяемое напряжение (рис. 9.4).

Когда два конденсатора соединены друг с другом, когда они заряжены, общая емкость равна  $S = C_1 + C_2$ . Согласно закону сохранения зарядов, сумма начальных зарядов в конденсаторах будет равна  $q_{\text{общ}} = q_1 + q_2$  сумме зарядов, образующихся после их подключения  $q'_{\text{общ}} = q'_1 + q'_2$ , т. е.  $q_1 + q_2 = q'_1 + q'_2$  будет. Заряд течет от конденсатора большего напряжения к конденсатору малого напряжения, и обменный ток зарядов в них продолжается до тех пор, пока их напряжение не станет равным  $U' = U'_1 = U'_2$ .

$$U' = \frac{q'_{\text{общ}}}{C_{\text{общ}}} = \frac{q'_1 + q'_2}{C_1 + C_2} = \frac{C_1 U'_1 + C_2 U'_2}{C_1 + C_2}$$

А оставшиеся величины нетрудно вывести из предыдущей формулы.

Следовательно, при создании разности потенциалов  $U_1$  и  $U_2$  и параллельном соединении конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ , отсоединенных от источника, заряды в каждом конденсаторе ( $q'_1$  и  $q'_2$ ), количество протекающего заряда  $\Delta q$  и напряжение, определяемое как  $U'$ , оказываются следующими (рис. 9.4):

$$\boxed{q'_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} (C_1 \cdot U_1 + C_2 \cdot U_2), \quad \Delta q = \frac{(U_1 - U_2) C_1 C_2}{C_1 + C_2}, \quad q'_2 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} (C_1 \cdot U_1 + C_2 \cdot U_2), \quad U' = \frac{C_1 \cdot U_1 + C_2 \cdot U_2}{C_1 + C_2}} \quad (9.9)$$

М.Д. Проверим, какой будет емкость, если в одну половину толщины между обложками конденсатора вставить одну, а в другую-вторую диэлектрические среды (рис. 9.5).

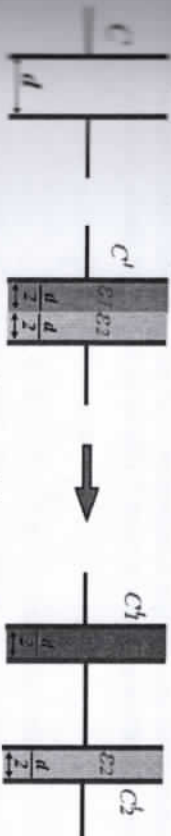


Рисунок 9.5

Емкость данного конденсатора равна  $S = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ . Это связано с тем, что при разделении между обложками конденсатора диэлектриков с поглощающей способностью  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  образуется новый конденсатор емкостью  $C'$ . Эти конденсаторы можно рассматривать как два последовательно соединенных конденсатора с емкостями  $C'_1$  и  $C'_2$ . При этом они будут иметь емкость.

$$C'_1 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_0 S}{d/2} = 2\epsilon_1 C \quad \text{и} \quad C'_2 = \frac{\epsilon_2 \epsilon_0 S}{d/2} = 2\epsilon_2 C$$

Результатирующая емкость равен:

$$C' = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{2\epsilon_1 C \cdot 2\epsilon_2 C}{2\epsilon_1 C + 2\epsilon_2 C} = \frac{2\epsilon_1 \epsilon_2 C}{\epsilon_1 + \epsilon_2}$$

Отсюда следует, что если половину расстояния между обложками плоского конденсатора емкостью  $C$  заполнить диэлектриком  $\epsilon_1$ , а другую половину - диэлектриком  $\epsilon_2$ , то результирующая емкость  $C'$  будет изменяться следующим образом (рис. 9.5):

$$C' = \frac{2 \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot C}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \quad (9.10)$$

5.2. Проверим, какой будет емкость, если в одну половину поверхности между обложками конденсатора вставить одну, а в другую - вторую диэлектрические среды (рис. 9.6).

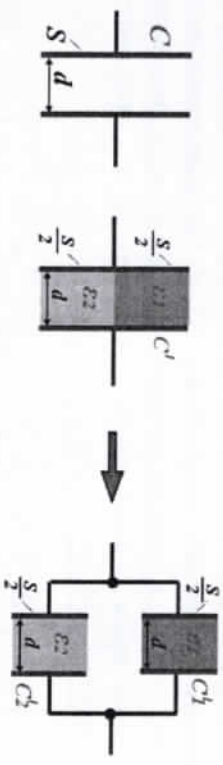


Рисунок 59.6

Емкость данного конденсатора равна  $C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ . Это связано с тем, что при введении между обложками конденсатора диэлектриков с поглощающей способностью  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  образуется новый конденсатор емкостью  $C'$ . Эти конденсаторы можно рассматривать как два параллельно соединенных конденсатора с емкостями  $C_1$  и  $C_2$ . При этом они будут иметь емкость.

$$C_1 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_0 S / 2}{d} = \frac{\epsilon_1}{2} C \quad \text{и} \quad C_2 = \frac{\epsilon_2 \epsilon_0 S / 2}{d} = \frac{\epsilon_2}{2} C$$

Результирующая емкость имеет следующий вид:

$$C' = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_1}{2} C + \frac{\epsilon_2}{2} C = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} C$$

Следовательно, если половину поверхности обложечек плоского конденсатора емкостью  $C$  заполнить диэлектриком  $\epsilon_1$ , а другую половину - диэлектриком  $\epsilon_2$ , то результирующая емкость  $C'$  изменится следующим образом (рис. 9.6):

$$C' = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} \cdot C \quad (9.11)$$

Прежде чем перейти к дальнейшим формулам, напомним следующее.

1) При подвешивании конденсатора к источнику тока параллельные обложки независимым образом изменяют расстояние между обложками или введение диэлектрика между обложками.

2) Если конденсатор после зарядки изолирован от источника тока, количество заряда в открытых обложках остается неизменным независимо от изменения расстояния между обложками или введения диэлектрика между обложками.

6.1. Давайте посмотрим, что происходит, когда конденсатор заряжается и подключает диэлектрик между обложками конденсатора, отключенного от источника (рис. 9.7).

Емкость конденсатора сначала  $C_1 = \frac{\epsilon_0 S}{d}$  будет, а потом  $C_2 = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} = \epsilon C_1$  будет.

За отключение от источника  $q_2 = q_1$ .

Напряжение сначала  $U_1 = \frac{q_1}{C_1}$  будет,

а потом  $U_2 = \frac{q_2}{C_2} = \frac{q_1}{\epsilon C_1} = \frac{U_1}{\epsilon}$  будет.

Энергия сначала  $W_1 = \frac{q_1 U_1}{2}$  будет, затем

$W_2 = \frac{q_2 U_2}{2} = \frac{q_1 U_1}{2\epsilon} = \frac{W_1}{\epsilon}$  будет. При этом энергия уменьшается в раз.

Здесь также соблюдается закон сохранения энергии. Энергия не теряется, а затрачивается на поляризацию диэлектрика.

Напряженность сначала  $E_1 = \frac{U_1}{d}$  будет, после  $E_2 = \frac{U_2}{d} = \frac{U_1}{\epsilon d} = \frac{E_1}{\epsilon}$  будет.

Такой образ, если между обложками плоского конденсатора, отключенного от источника заряда, ввести диэлектрик с поглощающей способностью  $\epsilon$ , то величины  $C$ ,  $q$ ,  $U$ ,  $W$ ,  $E$  изменятся следующим образом (рис. 9.7):

$$C_2 = \epsilon \cdot C_1, \quad q_2 = q_1, \quad U_2 = \frac{U_1}{\epsilon}, \quad W_2 = \frac{W_1}{\epsilon}, \quad E_2 = \frac{E_1}{\epsilon} \quad (9.12)$$

6.2. Рассмотрим, что происходит при удалении диэлектрика между обложками конденсатора, отключенного от источника заряда (рис. 9.8).

Емкость конденсатора сначала  $C_1 = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$  если, а потом  $C_2 = \frac{\epsilon_0 S}{d} = \frac{C_1}{\epsilon}$  будет.

За отключение от источника  $q_2 = q_1$  будет.

Напряжение сначала  $U_1 = \frac{q_1}{C_1}$  будет, затем

$U_2 = \frac{q_2}{C_2} = \frac{\epsilon q_1}{C_1} = \epsilon U_1$  будет.

Энергия сначала  $W_1 = \frac{q_1 U_1}{2}$  будет, после  $W_2 = \frac{q_2 U_2}{2} = \frac{\epsilon q_1 \epsilon U_1}{2} = \epsilon W_1$  будет. При этом энергия увеличивается в  $\epsilon$  раз. Здесь также соблюдается закон

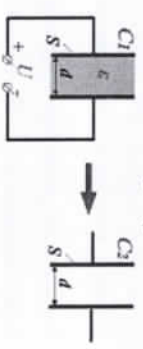


Рисунок 9.8

сохранения энергии. Энергия не существует из ничего, но внешняя сила на извлечение диэлектрика выполняет работу, равную  $A = W_2 - W_1 = (\epsilon - 1)W_1$ .

Напряженность сначала  $E_1 = \frac{U_1}{d_1}$ , то, после имеет вид:

$$E_2 = \frac{U_2}{d_2} = \frac{\epsilon U_1}{d_1} = \epsilon E_1$$

Таким образом, если диэлектрик с поглощающей способностью  $\epsilon$  между обложками плоского конденсатора, отсоединенного от источника с зарядом, удлинить, то величины  $C, q, U, W, E$  изменятся следующим образом (рис. 9.8):

$$C_2 = \frac{C_1}{\epsilon}; \quad q_2 = q_1, \quad U_2 = \epsilon \cdot U_1, \quad W_2 = \epsilon \cdot W_1, \quad E_2 = \epsilon \cdot E_1 \quad (9.13)$$

6.3. Посмотрим, что происходит при введении диэлектрика между обложками конденсатора, подключенного к источнику (рис. 9.9).

Если емкость сначала было  $C_1 = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ , а потом  $C_2 = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} = \epsilon C_1$  будет.

Поскольку он подключен к источнику,

$$U_2 = U_1.$$

Заряд сначала было  $q_1 = C_1 U_1$ , а потом

$$q_2 = C_2 U_2 = \epsilon C_1 U_1 = \epsilon q_1$$

Энергия также сначала было  $W_1 = \frac{q_1 U_1}{2}$ ,

затем  $W_2 = \frac{q_2 U_2}{2} = \frac{\epsilon q_1 U_1}{2} = \epsilon W_1$  будет.

При этом энергия увеличивается в  $\epsilon$  раз. Здесь также соблюдается закон сохранения энергии. Дополнительная энергия поступает от источника тока.

Напряженность сначала  $E_1 = \frac{U_1}{d_1}$ , то, а потом  $E_2 = \frac{U_2}{d_2} = \frac{U_1}{d_1} = E_1$  будет.

Так, если между обложками плоского конденсатора, подключенного к источнику, ввести диэлектрик с поглощающей способностью  $\epsilon$ , то величины  $C, q, U, W, E$  изменятся так (рис. 9.9):

$$C_2 = \epsilon \cdot C_1, \quad q_2 = \epsilon \cdot q_1, \quad U_2 = U_1, \quad W_2 = \epsilon \cdot W_1, \quad E_2 = E_1 \quad (9.14)$$

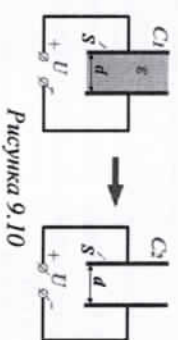
6.4. Давайте посмотрим, что происходит, когда диэлектрик между обложками конденсатора, подключенного к источнику, удлиняется (рис. 9.10).

Емкость конденсатора сначала было  $C_1 = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ , а потом  $C_2 = \frac{\epsilon_0 S}{d/k} = \frac{C_1}{k}$  будет.

Так как конденсатор подключенного к источнику  $U_2 = U_1$  будет.

Заряд сначала  $q_1 = C_1 U_1$ , то, после  $q_2 = C_2 U_2 = \frac{C_1}{k} U_1 = \frac{q_1}{k}$  будет.

Энергия сначала было  $W_1 = \frac{q_1 U_1}{2}$ , после  
ввести диэлектрика  $W_2 = \frac{q_2 U_2}{2} = \frac{q_1 U_1}{2k} = \frac{W_1}{k}$   
будет. Здесь энергия уменьшается в  $k$  раз.



Рисуника 9.10

Здесь также соблюдается закон сохранения энергии. Энергия не теряется, а возвращается к источнику тока.

Напряженность сначала  $E_1 = \frac{U_1}{d}$ , то, после  $E_2 = \frac{U_2}{d_2} = \frac{U_1}{d/k} = k E_1$  будет.

Таким образом, если между обложками плоского конденсатора, подключенного к источнику, убрать диэлектрик с поглощающей способностью  $\epsilon$ , то величины  $C, q, U, W, E$  изменятся следующим образом (рис. 9.10):

$$C_2 = \frac{C_1}{\epsilon}, \quad q_2 = \frac{q_1}{\epsilon}, \quad U_2 = U_1, \quad W_2 = \frac{W_1}{\epsilon}, \quad E_2 = E_1 \quad (9.15)$$

7.1. Давайте посмотрим, что происходит, когда конденсатор отключается от источника при заряде расстояние между обложками конденсатора, уменьшается (рис. 59.11).

Если емкость конденсатора было сначала  $C_1 = \frac{\epsilon_0 S}{d_1}$ , то, а после уменьшение

расстояние  $C_2 = \frac{\epsilon_0 S}{d_2} = \frac{\epsilon_0 S}{d_1/k} = k C_1$  будет.

После отключение от источника  $q_2 = q_1$  будет.

Напряжение конденсатора сначала

$U_1 = \frac{q_1}{C_1}$ , то, после уменьшение расстояние

$U_2 = \frac{q_2}{C_2} = \frac{q_1}{k C_1} = \frac{U_1}{k}$  будет.

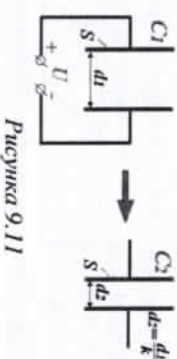
Энергия сначала  $W_1 = \frac{q_1 U_1}{2}$ , а потом  $W_2 = \frac{q_2 U_2}{2} = \frac{q_1 U_1}{2k} = \frac{W_1}{k}$  будет. Здесь энергия

уменьшается в  $k$  раз. Здесь также соблюдается закон сохранения энергии.

Не теряя энергии, а приближаясь к обложкам, электрическое поле выполняет работу за свой счет.

Напряженность сначала  $E_1 = \frac{U_1}{d_1}$ , то, после  $E_2 = \frac{U_2}{d_2} = \frac{U_1/k}{d_1/k} = \frac{U_1}{d_1} = E_1$  будет.

Таким образом, если расстояние между обложками плоского конденсатора, отключенного от источника с зарядом, уменьшить в  $k$  раз, то величины  $C, q, U, W, E$  изменятся следующим образом (рис. 9.11):



Рисуника 9.11

$$C_2 = k \cdot C_1, \quad q_2 = q_1, \quad U_2 = \frac{q_1}{k}, \quad W_2 = \frac{W_1}{k}, \quad E_2 = E_1 \quad (9.16)$$

**7.2.** Давайте посмотрим, что происходит, когда расстояние между обложками конденсатора, отключенного от источника заряда, увеличивается (рис. 9.12).

Емкость сначала было  $C_1 = \frac{\epsilon_0 S}{d_1}$ , затем

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 S}{d_2} = \frac{\epsilon_0 S}{k d_1} = \frac{C_1}{k} \text{ будет.}$$

Так как конденсатор отключен от источника  $q_2 = q_1$  будет.

Напряжение конденсатора сначала

$$U_1 = \frac{q_1}{C_1}, \text{ а потом } U_2 = \frac{q_2}{C_2} = \frac{q_1}{C_1/k} = k U_1 \text{ будет.}$$

Энергия конденсатора также сначала  $W_1 = \frac{q_1^2}{2C_1}$  то, после

$W_2 = \frac{q_2^2}{2C_2} = \frac{q_1^2}{2 \cdot \frac{C_1}{k}} = k W_1$  будет. При этом энергия увеличивается в  $k$  раз. Здесь

также соблюдается закон сохранения энергии. Внешняя сила выполняет работу по удалению покрытия, не теряя энергии из ничего.

Напряженность сначала  $E_1 = \frac{U_1}{d_1}$ , потом  $E_2 = \frac{U_2}{d_2} = \frac{k U_1}{k d_1} = \frac{U_1}{d_1} = E_1$  будет.

Таким образом, если расстояние между обложками плоского конденсатора, отключенного от источника заряда, увеличить в  $k$  раз, то величины  $C, q, U, W, E$  изменятся следующим образом (рис. 9.12):

$$C_2 = \frac{C_1}{k}, \quad q_2 = q_1, \quad U_2 = k \cdot U_1, \quad W_2 = k \cdot W_1, \quad E_2 = E_1 \quad (9.17)$$

**7.3.** Посмотрим, что происходит, когда расстояние между обложками конденсатора, подключенного к источнику, уменьшается (рис. 9.13).

Если емкость конденсатора сначала было  $C_1 = \frac{\epsilon_0 S}{d_1}$ , после уменьшения

расстояние  $C_2 = \frac{\epsilon_0 S}{d_2} = \frac{\epsilon_0 S}{d_1/k} = k C_1$  будет.

Поскольку конденсатор подключен к источнику,  $U_2 = U_1$  будет.

Заряд сначала  $q_1 = C_1 U_1$  то, после  $q_2 = C_2 U_2 = k C_1 U_1 = k q_1$  будет.

Энергия сначала  $W_1 = \frac{q_1^2}{2C_1}$  то, после

$W_2 = \frac{q_2^2}{2C_2} = \frac{k^2 q_1^2}{2 \cdot \frac{C_1}{k}} = k W_1$  будет.

При этом энергия увеличивается в  $k$

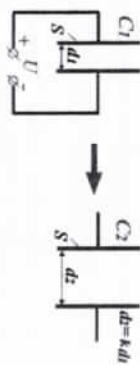


Рисунок 9.12

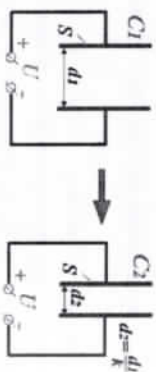


Рисунок 9.13

раз. Здесь также соблюдается закон

сохранения энергии. Дополнительная энергия поступает от источника тока. Напряжение будет сначала  $E_1 = \frac{U_1}{d_1}$ , то потом  $E_2 = \frac{U_2}{d_2} = \frac{U_1}{d_1/k} = k E_1$  будет.

Таким образом, если расстояние между обложками плоского конденсатора, подключенного к источнику, уменьшить в  $k$  раз, то величины  $C, q, U, W, E$  изменятся следующим образом (рис. 9.13):

$$C_2 = k \cdot C_1, \quad q_2 = k \cdot q_1, \quad U_2 = U_1, \quad W_2 = k \cdot W_1, \quad E_2 = k \cdot E_1 \quad (9.18)$$

**7.4.** Посмотрим, что происходит, когда увеличивается расстояние между обложками конденсатора, подключенного к источнику (рис. 9.14).

Емкость будет, если сначала  $C_1 = \frac{\epsilon_0 S}{d_1}$ , то потом  $C_2 = \frac{\epsilon_0 S}{k d_1} = \frac{C_1}{k}$ .

Поскольку он подключен к источнику,  $U_2 = U_1$ .

Заряд будет сначала, если  $q_1 = C_1 U_1$ , а

потом  $q_2 = C_2 U_2 = \frac{C_1}{k} U_1 = \frac{q_1}{k}$ .

Энергия будет, если сначала  $W_1 = \frac{q_1^2}{2C_1}$ , то потом  $W_2 = \frac{q_2^2}{2C_2} = \frac{q_1^2}{2kC_1} = \frac{W_1}{k}$ .

При этом энергия уменьшается в  $k$  раз. Здесь также соблюдается закон сохранения энергии. Энергия не теряется, а возвращается к самому источнику тока. Напряженность будет, если сначала  $E_1 = \frac{U_1}{d_1}$ , то потом

$$E_2 = \frac{U_2}{d_2} = \frac{U_1}{k d_1} = \frac{E_1}{k}. \quad (9.19)$$

Таким образом, если расстояние между обложками плоского конденсатора, подключенного к источнику, увеличить в  $k$  раз, то величины  $C, q, U, W, E$  изменятся так (рис. 9.14):

Если емкость конденсатора сначала была  $C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ .

При установке металлического проводника между заданными обложками конденсатора образуются два последовательно соединенных конденсатора с расстояниями между их обложками  $d_1$  и  $d_2$ . Это будут емкости конденсаторов.

$$C_1' = \frac{\epsilon_0 S}{d_1} \text{ и } C_2' = \frac{\epsilon_0 S}{d_2}$$

Здесь  $d_1 + d_2 = d - \ell$ . Результирующая емкость  $C'$  находится в двух последовательно соединенных  $C_1$  и  $C_2$  вычисляется по емкостям.

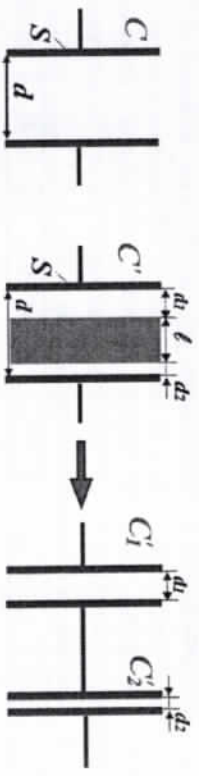


Рисунок 9.15

$$C' = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\frac{\epsilon_0 S \epsilon_0 S}{d_1 d_2}}{\frac{\epsilon_0 S}{d_1} + \frac{\epsilon_0 S}{d_2}} = \frac{\epsilon_0 S}{d_1 + d_2} = \frac{\epsilon_0 S}{d - \ell} = \frac{d}{d - \ell} \frac{\epsilon_0 S}{d} = \frac{d}{d - \ell} C$$

Таким образом, если между плоскими обложками конденсатора с емкостью  $C$  вставить проводящую пластину толщиной  $\ell$  ( $\ell < d$ ), получается, что полученная емкость будет (рис. 9.15):

$$C' = \frac{d}{d - \ell} C \quad (9.20)$$

8.2. Посмотрим, что произойдет, когда диэлектрическая пластина вставляется между обложками конденсатора (рис. 9.16).

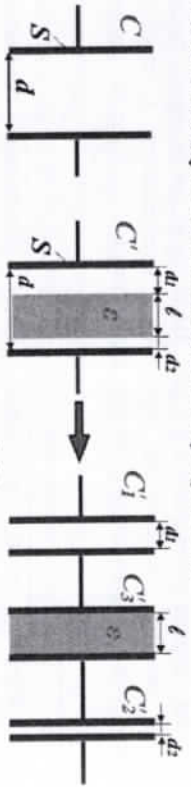


Рисунок 9.16

Емкость данного конденсатора равна  $C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ . При введении диэлектрика между заданными обложками конденсатора образуются три последовательных конденсатора расстояния между обложками которых равны  $d_1$ ,  $d_2$  и  $\ell$ . Это будут емкости конденсаторов.

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 S}{d_1}, C_2 = \frac{\epsilon_0 S}{d_2} \text{ и } C_3 = \frac{\epsilon_0 S}{\ell}$$

Здесь  $d_1 + d_2 = d - \ell$ . Результирующая емкость  $C'$  соединяется с тремя последовательно соединенными  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  вычисляется по емкостям.

$$\frac{1}{C'} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{d_1}{\epsilon_0 S} + \frac{d_2}{\epsilon_0 S} + \frac{\ell}{\epsilon_0 S} = \frac{d_1 + d_2 + \ell}{\epsilon_0 S} = \frac{d}{\epsilon_0 S} = \frac{1}{C}$$

Тем самым образом, если между плоскими обложками конденсатора с емкостью  $C$  вставить диэлектрик  $\epsilon$  толщиной  $\ell$  ( $\ell < d$ ), результирующая емкость будет следующей (рисунок 9.16):

$$C' = \frac{\epsilon d}{\epsilon d + (1 - \epsilon)\ell} C \quad (9.21)$$

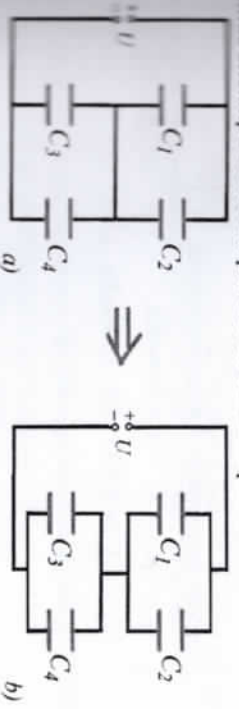
Приведенные выше формулы являются специальными формулами, и их использование очень удобно при решении задач. Он также развивает способность студента работать с формулами при решении нестандартных задач.

**Вопросы по теме:**

1. Какое полное напряжение, общий заряд и общая емкость при последовательном соединении конденсаторов?
2. Какое полное напряжение, общий заряд и общая емкость при параллельном подключении конденсаторов?
3. Как распределяется напряжение между конденсаторами при последовательном включении?
4. Какой заряд течет при подключении конденсаторов с известной емкостью и зарядом, какое заряд на каждом из них и установленный потенциал?
5. Какой заряд течет при подключении конденсаторов с известными емкостью и потенциалом, какое заряд на каждом из них и установленный потенциал?
6. Как изменяется емкость, когда между обложками вставляется проводник?
7. Как изменяется емкость при вставке диэлектрика между обложками?

**Решение задач:**

1.4. Образована схема подключена к источнику тока  $U = 12$  В. Емкость конденсаторов,  $C_1 = C_4 = 2$  мкФ,  $C_2 = 4$  мкФ и  $C_3 = 1$  мкФ. Определите количество электрического заряда в конденсаторах 1 и 4.



Дано:

$$C_1 = C_4 = 2 \text{ мкФ}$$

$$C_2 = 4 \text{ мкФ}$$

$$C_3 = 1 \text{ мкФ}$$

$$U = 12 \text{ В}$$

$$q_1, q_2, q_3 = ?$$

Решение:

Прежде всего, чтобы было легче понять, давайте перейдем от рисунка а к рисунку б, который является его эквивалентом. Из рисунка в видно, что конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  параллельны, к ним последовательно подключены конденсаторы  $C_3$  и  $C_4$  параллельно. Соответственно находим емкость.

$$C_{12} = C_1 + C_2 = 6 \text{ мкФ}, \quad C_{34} = C_3 + C_4 = 3 \text{ мкФ}$$

$$C_{\text{общ}} = \frac{C_{12} \cdot C_{34}}{C_{12} + C_{34}} = \frac{6 \cdot 3}{6 + 3} = 2 \text{ мкФ}$$

Определим электрические заряды и падение напряжения.

$$Q_{\text{общ}} = C_{\text{общ}} U = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 12 = 24 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} = 24 \text{ мкКл}, \quad q_{12} = q_{34} = Q_{\text{общ}} = 24 \text{ мкКл}$$

$$U_{12} = \frac{q_{12}}{C_{12}} = \frac{24 \cdot 10^{-6}}{6 \cdot 10^{-6}} = 4 \text{ В}, \quad U_1 = U_2 = U_{12} = 4 \text{ В}$$

$$U_{34} = \frac{q_{34}}{C_{34}} = \frac{24 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-6}} = 8 \text{ В}, \quad U_3 = U_4 = U_{34} = 8 \text{ В}$$

Теперь найдем искомые величины.

$$q_1 = C_1 U_1 = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 8 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} = 8 \text{ мкКл}, \quad q_2 = C_2 U_2 = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 8 = 16 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} = 16 \text{ мкКл}$$

Ответ:  $q_1 = 8 \text{ мкКл}$ ;  $q_2 = 16 \text{ мкКл}$

2. На рисунке  $C_1 = 1 \text{ мкФ}$  и  $C_2 = 3 \text{ мкФ}$  приведены электрические емкости конденсаторы, заряженные до напряжения  $U = 100 \text{ В}$ , но в обратном порядке. Каким будет напряжение между точками А и В при включение ключей  $S_1$  и  $S_2$ ? Какими будут величины зарядов в каждом конденсаторе?

Дано:

$$C_1 = 1 \text{ мкФ}$$

$$C_2 = 3 \text{ мкФ}$$

$$U = 100 \text{ В}$$

$$U' = ?$$

$$q_1, q_2 = ?$$

Решение:

Используем приведенную в теме формулу.

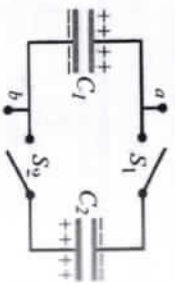
$$U' = \frac{C_1 U_1 - C_2 U_2}{C_1 + C_2} = \frac{1 \cdot 100 - 3 \cdot (-100)}{1 + 3} = 50 \text{ В}$$

Определим заряды в конденсаторах.

$$q_1 = C_1 U' = 10^{-6} \cdot 50 = 50 \text{ мкКл}$$

$$q_2 = C_2 U' = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 50 = 150 \text{ мкКл}$$

Ответ:  $U' = 50 \text{ В}$ ;  $q_1 = 50 \text{ мкКл}$ ;  $q_2 = 150 \text{ мкКл}$



### ТЕСТЫ ПО ГЛАВЕ

1. Из нейтрального тела было получено  $5 \cdot 10^{13}$  электронов. Найти заряд (в  $\mu\text{Кл}$ ) тела.  $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ .  
А) 0,32 В) 1,6 С) 8 Д) 6
2. Если на электризованному телу не хватает 4000 электронов, как он будет заряжен (в  $\text{Кл}$ )?  $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ .  
А)  $-6,4 \cdot 10^{-19}$  В)  $-6,4 \cdot 10^{-22}$  С)  $-6,4 \cdot 10^{-16}$  Д)  $+6,4 \cdot 10^{-16}$
3. Если силой ( $nH$ ) они взаимодействуют, если среднее расстояние между двумя соседними ионами в кристалле  $\text{NaCl}$  составляет  $3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ ?  
А) 1 В) 2,56 С) 5,5 Д) 3,2
4. Две сферы, закрепленные на нитях длиной  $l$ , подвешены в одной точке. На каком расстоянии друг от друга они могут удалиться, если в состоянии покоя они сферам придается одинаковые знаковые заряды?  
А)  $\sqrt{l}$  В)  $l$  С)  $l/2$  Д)  $2l$
5. Две сферы с зарядом  $q_1 = q_2$ , массой  $0,25 \text{ г}$  каждая, подвешены в одной точке на нитях длиной  $100 \text{ см}$ , убежали друг от друга на  $6 \text{ см}$ . Во сколько раз увеличился заряд каждой сферы?  
А) 3,4 В) 6,7 С) 7,9 Д) 10
6. На заряд в  $12 \text{ мкКл}$  в одной точке поля действует сила  $3 \text{ мН}$ . Найти напряженность поля в этой точке (В/м).  
А) 250 В) 40 С) 25 Д) 36
7. Если в электрическом поле с напряженностью  $1,5 \cdot 10^5 \text{ В/м}$  на частицу пыли действует сила  $2,4 \cdot 10^{-10} \text{ Н}$ , сколько лишних электронов в ней?  
А)  $1,5 \cdot 10^4$  В)  $1 \cdot 10^5$  С)  $1,6 \cdot 10^5$  Д)  $1 \cdot 10^4$
8. Заряды  $16 \text{ нКл}$  и  $36 \text{ нКл}$  расположены на расстоянии  $4 \text{ см}$  друг от друга. На каком расстоянии от первого заряда находится точка, напряженность поля в которой равна нулю?  
А)  $16 \text{ см}$  В)  $1,6 \text{ см}$  С)  $16 \text{ м}$  Д)  $1,6 \text{ м}$ .
9. Металлический шар радиусом  $10 \text{ см}$  получил заряд в  $20 \text{ нКл}$ . Найти напряженность поля на расстоянии  $3 \text{ см}$  от центра сферы (кВ/м).  
А) 60 В) 200 С) 100 Д) 0

10. Металлический шар радиусом 50 см получил заряд в 5 нКл. Найти напряженность электрического поля вблизи поверхности сферы (В/м).  
 А) 0 В) 1,8 С) 18 Д) 180
11. Каково напряжение электрического поля на расстоянии, равном его радиусу от сферической поверхности, поверхностная плотность заряда которой  $\sigma$ ?  
 А)  $\frac{\sigma}{4\epsilon_0}$  В)  $\frac{\sigma}{\epsilon_0}$  С)  $\frac{\sigma}{2\epsilon_0}$  Д)  $\frac{2\sigma}{\epsilon_0}$
12. Радиус Земли 6400 км, напряженность электрического поля на ее поверхности 130 В/м. Каков заряд Земли (Кл)?  
 А)  $4,8 \cdot 10^6$  В)  $5,9 \cdot 10^5$  С)  $6,5 \cdot 10^5$  Д)  $8,2 \cdot 10^5$
13. 1 нКи заряд находится на расстоянии 1 м от плоскости, ограниченной плоским зарядом. На него действует сила 0,1 мН. Какая (мН) сила действует на него, если заряд переместить на расстоянии 2 м от плоскости?  
 А) 0,2 В) 0,1 С) 0,05 Д) 0,01
14. Сколько кВ/м составит напряженность его электрического поля, если поверхностная плотность бесконечного плоского пластинчатого заряда в пространстве равна  $17,7 \text{ нКл/м}^2$ ?  
 А) 1 В) 2 С) 3 Д) 8,85
15. Что произойдет, если диэлектрик, состоящий из полярных молекул, будет введен в однородное электрическое поле?  
 А) диполи в основном расположены в направлении поля.  
 В) дипольный сдвиг в направлении, противоположном полю.  
 С) дипольный сдвиг по полю.  
 Д) диполи в основном расположены вертикально в направлении поля
16. Как изменятся Кулоновские силы между ними, если два точечных заряда перенести из вакуума в среду с диэлектрической проницаемостью, равной 7, не изменяя величины и расстояния между ними?  
 А) уменьшатся в 49 раз  
 В) увеличатся в 49 раз  
 С) увеличатся в 7 раз  
 Д) уменьшатся в 7 раз
17. Как изменится их потенциальная энергия, если мы уменьшим расстояние между двумя одинаковыми точечными зарядами в 9 раз?  
 А) уменьшается в 3 раза.  
 В) увеличивается в 3 раза.

- С) уменьшается в 9 раз.  
 Д) увеличивается в 9 раз.
18. Чему равен потенциал поля точечного заряда на расстоянии 5r, если потенциал  $\varphi$  на расстоянии от заряда равен  $\varphi$ ?  
 А)  $2,5\varphi$  В)  $0,2\varphi$  С)  $2,5\varphi$  Д)  $9\varphi$
19. 1000 одинаковых капель воды, заряженных равными зарядами, соединились и превратились в большую сферическую каплю. Во сколько раз потенциал этой капли будет больше потенциала маленькой капли?  
 А) 3 В) 100 С) 20 Д) 30
20. В поле двух параллельных пластин с интервалом 15 см электрон перемещается с одной пластины на другую. Напряженность поля 10 кВ/м. Сколько молекул работы было сделано на этом?  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$   
 А) 2 В) 3 С) 9 Д) 4
21. Если заряд перемещается по эквипотенциальной поверхности, как изменится его потенциальная энергия?  
 А) уменьшается  
 В) не изменяется  
 С) увеличивается  
 Д) зависит от величины заряда.
22. Конденсатор заряжался и отсоединялся от источника, а затем заполнялся диэлектриком  $\epsilon = 3$ . Как меняется напряжение на конденсаторе?  
 А) уменьшается в 3 раза  
 В) уменьшается в 2 раза  
 С) увеличивается в 2 раза  
 Д) увеличивается в 3 раза
23. Три конденсатора с одинаковой электрической емкостью были параллельно параллельно к источнику напряжениями 2В. При этом каждый конденсатор получил заряд  $10^{-9} \text{ Кл}$ . Найти общую емкость ( $\mu\text{Ф}$ ) цепи.  
 А) 1400 В) 1500 С) 1600 Д) 1650
24. В цепи постоянного тока подключается батарея из 4 последовательно соединенных между собой конденсаторов. Какой конденсатор обладает наибольшей электрической мощностью?  
 А)  $C_1 = 6 \text{ мкФ}$  В)  $C_2 = 2 \text{ мкФ}$  С)  $C_3 = 10 \text{ мкФ}$  Д)  $C_4 = 1 \text{ мкФ}$

25. Как изменится энергия электрического поля в конденсаторе, если расстояние между обложками конденсатора, подключенного к источнику постоянного тока, увеличится в 2 раза?
- А) увеличится в 4 раза  
 В) уменьшится в 4 раза  
 С) не изменится  
 Д) уменьшится в 2 раза

#### ЗАДАНИЯ ПО ГЛАВЕ

1. От капли с электрическим зарядом  $+2q$  отделилась капля с зарядом  $-q$ . Каков электрический заряд оставшейся капли?
2. Как изменится сила их взаимодействия, когда два точечных заряда увеличатся в 2 раза, а расстояние между ними также увеличится в 2 раза?
3. С какой силой ( $mH$ ) взаимодействуют две частицы с зарядами  $4 \text{ нКл}$  и  $10 \text{ нКл}$ , расположенные на расстоянии  $2 \text{ см}$  друг от друга?
4. Чему равно ускорение частицы пыли массой  $0,1 \text{ мкг}$  и зарядом  $+1 \text{ нКл}$ , помещенной в однородное электрическое поле напряженностью  $E=2000 \text{ В/м}$  ( $\text{м/с}^2$ )? Напряженность направлена вертикально вверх.
5. Частица массой  $1 \text{ г}$  и зарядом  $+1 \text{ мкКл}$  падает в однородном электрическом поле с ускорением  $7,5 \text{ м/с}^2$ . Вектор напряженности электрического поля направлен вверх, вектор-вниз. Каково его числовое значение ( $\text{кВ/м}$ ). Не учитывайте сопротивление воздуха.
6. Заряды  $-16 \text{ нКл}$  и  $+36 \text{ нКл}$  расположены на расстоянии  $4 \text{ см}$  друг от друга. Определите, на каком расстоянии ( $\text{см}$ ) от второго заряда находится точка, напряженности поля которой равно нулю.
7. Какова будет сила взаимодействия кольца радиуса  $R$ , равномерно заряженного зарядом  $q$ , и точечного заряда  $q$ , расположенного в его центре?
8. Если напряженность поля на расстоянии  $10 \text{ см}$  от бесконечной плоскости, где поверхностная плотность его заряда  $\sigma$ , равна  $100 \text{ В/м}$ , то сколько  $\text{В/м}$  составит напряженность поля на расстоянии  $20 \text{ см}$  от него?
9. Как изменится сила взаимодействия зарядов, если расстояние между двумя точечными зарядами, находящимися в воздухе, в 3 раза уменьшится, а пространство заполнено веществом с диэлектрической проницаемостью, равной  $67$ ?

10. Два равных положительных заряда взаимодействуют в воде с силой  $1,6 \cdot 10^4 \text{ Н}$  на расстоянии  $3 \text{ см}$ . Пусть определится величина каждого заряда (кВ). Диэлектрическая проницаемость воды равна  $81$ .

11. Найти потенциальную энергию ( $\text{МДж}$ ) точечного заряда  $1 \cdot 10^5 \text{ Кл}$ , расположенного в точке электростатического поля с потенциалом  $5 \text{ В}$ .

12. Потенциал электрического поля на расстоянии  $20 \text{ см}$  от поверхности заряженной сферы радиусом  $10 \text{ см}$  равен  $300 \text{ В}$ . Каков потенциал в центре сферы ( $\text{В}$ )?

13. На расстоянии  $20 \text{ см}$  друг от друга находятся 2 точечных одноименных заряда по  $2 \text{ нКл}$ . Каков потенциал поля ( $\text{В}$ ) в точке между зарядами?

14. Сколько джоулей работы выполняется при перемещении положительного заряда  $2 \cdot 10^4 \text{ Кл}$  из точки электростатического поля с потенциалом  $40 \text{ В}$  в точку с потенциалом  $-10 \text{ В}$ ?

15. Два одинаковых точечных заряда  $1 \cdot 10^8 \text{ с}$  находятся в вакууме на расстоянии  $100 \text{ см}$  друг от друга. Сколько джоулей работы нужно выполнить, чтобы приблизить заряды друг к другу на расстояние до  $50 \text{ см}$ ?

16. При переносе заряда  $5 \cdot 10^6 \text{ Кл}$  из бесконечности в электростатическое поле выполнена работа  $30 \text{ мДж}$ . Каков потенциал точки поля, в которую введен заряд, относительно бесконечности ( $\text{В}$ )?

17. Анализное напряжение на диоде равно  $200 \text{ В}$ . Сколько электронов движется анода, когда электрическое поле выполняет работу  $1,6 \text{ Дж}$ ?  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ .

18. Энергия электрона в электрическом поле увеличилась с  $1 \cdot 10^7 \text{ м/с}$  до  $4 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ . Каково разность потенциалов между начальной и конечной точками ( $\text{В}$ )? Отношение заряда электрона к массе равно  $1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$ .

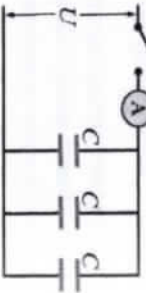
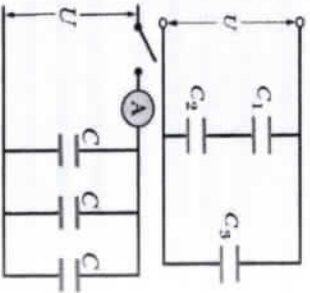
19. Электрон, перемещаясь между двумя точками в электрическом поле, имел скорость  $v=3 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ . Какова разность потенциалов между этими двумя точками ( $\text{В}$ )? заряд электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ , масса  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ . Начальная скорость электрона равна нулю.

20. Напряжение между двумя параллельными металлическими пластинами  $1 \text{ кВ}$ , расстояние между ними  $5 \text{ см}$ . Сколько ньютонов силы приложено к заряду  $1 \text{ мкКл}$ , расположенному между этими пластинами?

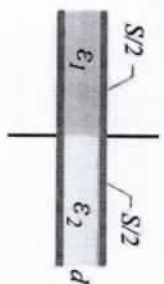
21. Частица пыли массой  $10^9 \text{ г}$  находится между горизонтально расположенными пластинами. Каков заряд частицы ( $\text{Кл}$ ). Если напряжение на пластинах  $1 \text{ кВ}$ , расстояние между ними  $5 \text{ см}$ ?



22. Каков угол между силовыми линиями поля и вектором перемещения, если в однородном электростатическом поле с напряжением заряда  $2 \text{ мкКл}$   $2 \cdot 10^3 \text{ В/м}$  при перемещении на  $10 \text{ см}$  выполнено  $0,2 \text{ мДж}$  работы?
23. Во сколько раз уменьшается потенциал первого шара, если заряженный шар радиусом  $R$  коснется незаряженного шара радиусом  $2R$ ?
24. Во сколько раз уменьшается заряд в конденсаторе  $C$ , если к заряженному конденсатору емкостью  $S$  параллельно подключить незаряженный конденсатор емкостью  $2C$ ?
25. Конденсатор емкостью  $2 \text{ мкФ}$  заряжался до напряжения  $110 \text{ В}$ . Затем его отключили от сети и подключили параллельно к конденсатору неизвестной емкости  $C_2$ . Тогда напряжение упало до  $44 \text{ В}$ . Найти  $C_2$  (мкФ).
26. Три конденсатора емкостью  $C_1=3 \text{ мкФ}$ ,  $C_2=12 \text{ мкФ}$  и  $C_3=30 \text{ мкФ}$  подключены по схеме на рисунке. Какова полная емкость (мкФ)?
27. Сколько джоулей энергии будет иметь конденсатор емкостью  $100 \text{ мкФ}$ , если его зарядить до  $100 \text{ мкФ}$ ?
28. Шар радиусом  $90 \text{ см}$  заряжается до потенциала  $40 \text{ кВ}$ . Найти энергию заряженного шара (Дж).  $k=9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$ .
29. А какие электрические емкости можно получить, подключив  $5 \text{ мкФ}$  и  $8 \text{ мкФ}$  емкостные конденсаторы (мкФ)?
30. Чему равна результирующая электрическая емкость (нФ), если пространство между сферическими оболочками конденсатора, состоящими из концентрических сферических проводников радиусами  $8 \text{ см}$  и  $5 \text{ см}$ , заполнено диэлектриком, поглощающая способность которого равна  $6$ ?
31. На рисунке представлена емкость каждого из конденсаторов  $25 \text{ мкФ}$ , изначально не заряженных. Кнопка была включена, чтобы создать разность потенциалов  $U=4200 \text{ В}$  между покрытиями. Сколько заряда протекает через амперметр  $A$ ?
32. Определите эквивалентную емкость для цепи, представленной на рисунке. В этом  $C_1=10 \text{ мкФ}$ ,  $C_2=8 \text{ мкФ}$  и  $C_3=4 \text{ мкФ}$ . Какое напряжение на каждом конденсаторе, если  $U=18 \text{ В}$ ?



33. Плоская поверхность  $S=18 \text{ см}^2$ , конденсатор на рисунке представляет собой пространство между покрытиями, равное  $d=3 \text{ мм}$ . Нижняя поверхность покрытия была выполнена диэлектриком  $\epsilon_1=7$ , а другая половина — диэлектриком  $\epsilon_2=10$ . Найти произвольную электрическую емкость (нФ).





Движение заряженных частиц, образующих ток проводимости, напрямую невозможно отследить. Но о наличии тока в проводнике можно узнать по его воздействию, по тем или иным событиям, которые с ним происходят.

1. Любой ток и движущаяся заряженная частица создают вокруг себя магнитное поле, т. е. наблюдается магнитное воздействие тока.

2. При прохождении тока по проводникам проводник нагревается за счет неупругого столкновения свободных электронов с узлами решетки, т. е. наблюдается тепловой эффект тока.

3. При прохождении тока через растворы электролита, щелочи и соли происходит электролитическая диссоциация и диссоциация вещества, т. е. наблюдается химическое действие тока.

Ток, величина и направление которого не изменяются во времени, называется постоянным током. Чтобы ток в цепи был постоянным, разность потенциалов между двумя произвольными точками цепи должна быть неизменной.

#### Сила тока и плотность тока:

Внутри металлического проводника в тепловом движении участвуют бесчисленные свободные электроны. Но поскольку движение этих электронов хаотично направлено в разные стороны, они не могут генерировать электрический ток. Когда мы отделим небольшую поверхность от проводника, равное количество свободных электронов пройдет через эту поверхность в противоположную сторону за единицу времени. Следовательно, результирующий ток также будет равен нулю.

Теперь, когда разность потенциалов подается на концы металлической проволоки, внутри металла возникает электрическое поле, и это поле действует на электроны с силой  $F=eE$ . Эта сила заставляет электроны двигаться в своем направлении и в направлении, противоположном линиям напряженности. Именно тогда возникает упорядоченная движение заряженных частиц в одну сторону, и в цепи возникает ток (рис. 10.2).

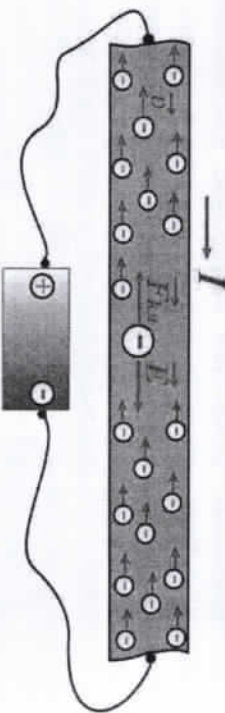


Рисунок 10.2

Внутри металлического проводника электрический ток возникает из-за упорядоченного движения свободных электронов. Направление электронов

таково же, как и направление силы Кулона, и будет направлено против линии напряженности. Кроме того, направление силы тока также будет направлено против направления электронов.

Скорость движения, количественно равная величине заряды, пропорционально в единицу времени от поверхности поперечного сечения проводника, называется силой тока.

Если через поверхность поперечного сечения проводника через некоторый промежуток времени  $\Delta t$  протекает количество заряда  $\Delta q$ , то средняя сила тока будет равна:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (10.1)$$

Если через поверхность поперечного сечения проводника через очень малый элементарный промежуток времени  $dt$  протекает очень небольшое количество элементарного заряда постоянного тока  $dq$ , мгновенная сила тока в момент  $t$  будет равна:

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} = q' \quad (10.2)$$

Следовательно, сила тока является производной первого порядка от заряда по времени.

Единица измерения силы тока измеряется в Амперах (А) в честь ученого Аншера, который ввел эту единицу измерения. Если через поверхность поперечного сечения проводника в течение  $t$  с времени протекает количество заряда  $Q$  Кл, то сила такого тока будет равна  $I = Q/t$ .

$$1 \text{ A} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ с}} \quad (10.3)$$

Векторная величина, равная отношению силы тока в проводнике к поперечности поперечного сечения, называется плотностью тока. Другими словами, плотность тока-это сила тока, проходящая через единицу поперечности.

$$J = \frac{I}{S} \quad (10.4)$$

Плотность тока-это векторная величина, направление которой совпадает с направлением направлением поверхности, по которой протекает положительный заряд. На участке с большей поверхностью тока будет меньше, и наоборот, на большее значение. Чем больше плотность тока, тем быстрее движется заряженные частицы.

Единицей измерения плотности тока в СИ  $\left[\frac{A}{M^2}\right]$ , но иногда мы также сталкиваемся с единицами измерения  $\left[\frac{A}{CM^2}\right]$  и  $\left[\frac{A}{MM^2}\right]$ . Запишем связь между ними.

$$1 \frac{A}{CM^2} = 10^4 \frac{A}{M^2}, \quad 1 \frac{A}{MM^2} = 10^6 \frac{A}{M^2}$$

**Закон Ома для участка цепи:**

Для движения зарядов по проводнику необходимо, чтобы на концах проводника была разность потенциалов, то есть внутри проводника должно быть электрическое поле. Разность потенциалов на концах проводника, в отличие от электростатической, также называется напряжением и обозначается латинской буквой  $U$ .

Разность потенциалов или напряжением на концах проводника называют физическую величину, при которой электрическое поле в проводнике при перемещении единицы положительного заряда по проводнику количественно равно работе, выполняемой силой.

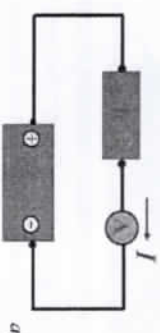
$$U = \frac{A}{q}$$

Эксперименты по определению связи между напряжением и силой тока в проводнике были впервые проведены немецким физиком Ом Георгом Симоном в 1826 году.

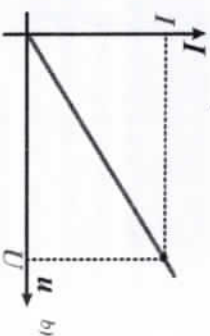
При постепенном повышении напряжения на полюсах проводника по данным эксперимента сила тока также возрастала прямо пропорционально напряжению ( $I \sim U$ ) (рис.10.3). Поэтому коэффициент перешел от пропорциональности к равенству путем введения.

$$I = GU \quad (10.5)$$

Здесь:  $G$  – коэффициент пропорциональности, который называется проводимостью проводника. Чем лучше проводимость, тем больший ток проходит через проводник при одном и том же напряжении.



a)



b)

Рисунок 10.3

Единицей проводимости в СИ является сименс (См).

Проводимость  $I$  См относится к проводимости проводника, через который проходит ток  $I$  А, когда на его концах есть напряжение  $U$  В.

Единко обычно в практических расчетах используют выражение, пропорциональное проводимости – сопротивление проводника

$$R = \frac{1}{G} \quad (10.6)$$

Разные проводники по-разному ограничивают ток, проходящий через них, или по-разному сопротивляются току.

Сопротивление проводника измеряется в Ом. Сопротивление проводника с проводимостью  $I$  См равно  $1$  Ом.

$$1 \text{ Ом} = \frac{1}{1 \text{ См}} \quad (10.7)$$

Каждому проводнику ограничивать ток в цепи называется сопротивлением проводника.

Мagnitude силы тока  $I$  от напряжения  $U$  через сопротивление проводника  $R$  будет следующей:

$$I = \frac{U}{R} \quad (10.8)$$

Несколько вышеупомянутая связь была впервые определена Георгом Симоном Омом, эта связь называется законом Ома для части цепи в его честь. Этот закон определяется как:

Сила тока, проходящего через участок цепи, прямо пропорциональна напряжению на концах проводника и обратно пропорциональна сопротивлению проводника.

Сопротивление проводника  $I$   $\Omega$  также можно определить так:

Сопротивление  $I$  Ом называется сопротивлением проводника, который проводит ток  $I$  А, когда напряжение на его концах составляет  $U$  В.

Сопротивление проводника-величина, зависящая от его геометрических размеров и вида материала. Предполагая, что чем больше поверхность поперечного сечения проводника, тем шире свободного пробега электронов и тем свободнее эти электроны пробегают, не отталкиваясь друг от друга, то мы приходим к выводу, что сопротивление обратно пропорционально поперечности поперечного сечения проводника. Предполагая, что чем длиннее длина проводника, тем больше свободных электронов сталкиваются на этом длинном проводнике с узлами в кристаллических решетках, то мы приходим к выводу, что сопротивление прямо пропорционально длине проводника.

Сопротивление проводника зависит от геометрических размеров проводника и типа материала следующим образом:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (10.9)$$

Здесь:  $l$  — длина проводника;  $S$  — площадь поперечного сечения проводника;  $\rho$  — удельное сопротивление проводника, а его числовое значение для разных материалов разное. Численные значения удельного сопротивления приведены в приложении для различных материалов. Удельное сопротивление является единицей измерения в СИ  $[\rho] = [Om \cdot m]$ , но иногда используются  $\left[ \frac{Om \cdot m}{cm^2} \right]$  и  $\left[ \frac{Om \cdot m}{mm^2} \right]$  другие единицы измерения. Связь между ними будет следующей:

$$1 \frac{Om \cdot m}{cm^2} = 10^4 Om \cdot m, \quad 1 \frac{Om \cdot m}{mm^2} = 10^6 Om \cdot m$$

Величина, обратная удельному сопротивлению, называется удельной проводимостью.

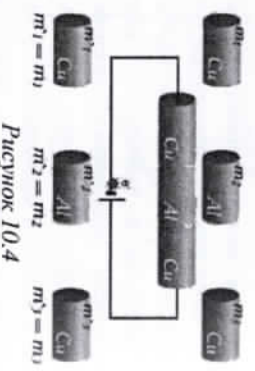
$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (10.10)$$

Удельная проводимость в СИ будет единицей измерения  $[\sigma] = [Om^{-1} \cdot m^{-1}] = Sm/m$ .

**Эксперименты по проверке электрической проводимости металлов:**

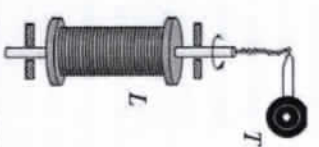
Понятие о том, что электрический ток в металлах переносится электронами, пришло не сразу. В результате нескольких экспериментов, проведенных в начале XX века, эта идея нашла свое подтверждение. Давайте познакомимся с некоторыми из этих переживаний. Рисунок 10.4

1) **Опыт Рикке.** В 1901 году немецкий физик К.Рикке провел этот эксперимент. Он берет три очень точно взвешенных на весах цилиндра — два медных и один алюминиевый проводники и скрепляет их шлифованным покрытием нитями друг к другу (рис.10.4). Затем цилиндры выдерживали в том же состоянии резбы и пропускали через них большой ток, который питал городскую трамвайную сеть в течение года. Затем, держа стропы в таком же состоянии, через них проходил большой ток, обеспечивающий трамвайную сеть города в течение года. За этот период через цилиндры было проведено



более 3,5 млн. Кл заряд прошел. Через год проводники отделили от тока, а затем второй раз измерили их массу на весах с предельной точностью — 0,03 мг. Результаты эксперимента показали, что масса каждого из них была равна массе одного года назад, то есть массы не изменились в результате прохождения тока. При наблюдении под микроскопом соприкасающихся контактных поверхностей было обнаружено, что диффузия одного металла в другой также не происходит.

2) **Опыт Манделъштата-Папалекси.** Для изучения природы носителей тока в металлах ученые-физики Д.Д.Манделъштам и Н.Д.Папалекси провели замечательный эксперимент в 1913 году. Идея эксперимента состоит в том, чтобы индуцировать электрический ток, который возникает, когда быстро движущийся проводник внезапно останавливается. Если металлический стержень, движущийся вперед со скоростью, резко останавливается, свободные электроны, движущиеся вместе с этим стержнем, продолжат свое движение по инерции, что приведет к возникновению кратковременного тока в стержне. Опыт Манделъштата и Папалекси был проведен с использованием этого свойства инерции. Катюшка провода, концы которой соединены с телефонной трубкой Т, совершает быстрые вращательные колебания вокруг своей оси (рис.10.5). При этом в цепи появляется ток, который создает звук в телефонной трубке. Этот эксперимент подтвердил существование инерционного движения носителей заряда в металлах.



3) **Опыт Стюарта-Толмена.** Эксперимент, похожий на эксперимент Манделъштата-Папалекси, был проведен в 1916 году американскими физиками Т.Стюарт и Р.Толмены провели. Схема их эксперимента изображена на рисунке 10.6. Катюшку многовитковую проволоки из тонкой проволоки общей длиной 500 м вращали с большой скоростью — скорость вращения катушечного фланца 300 м/с. Рисунок 10.6. Намотанный на катушку концы проводника соединяются с чувствительным гальванометром с помощью контактом. При резком торможении с помощью специального устройства, которое быстро вращалось, гальванометр показал, что возник инерционный ток. Кроме того, направление тока соответствовало бы инерционному движению отрицательно заряженных частиц. В результате этого эксперимента было установлено, что удельный заряд носителей заряда равен именно электрону  $\frac{q}{m} = \frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{Кл}{кг}$ . Таким образом, оказалось, что в металлах носителями тока могут быть только электроны.

4) Классико-электронная теория Друде. В 1900 году немецкий физик П. Друде создал теорию электропроводности металлов, основанную на представлении о том, что электрический ток в металлах состоит из упорядоченного движения свободных электронов в пространстве кристаллической решетки под действием внешнего электрического поля. В основе его теории лежат следующие гипотезы:

- свободные электроны в металлах ведут себя как молекулы идеального газа;
- свободные электроны в металлах подчиняются законам Ньютона в классической механике;
- свободные электроны в своем хаотическом движении сталкиваются не друг с другом, а с ионами кристаллической решетки;
- электроны отдают свою кинетическую энергию ионам при столкновении с ионами.

Конечно, эти гипотезы не могут раскрыть истинную картину явления (движение электронов подчиняется законам квантовой механики). Тем не менее, классико-электронная теория Друде позволила объяснить законы тока.

**Вопросы по теме:**

1. Что называется током? Какова формула и единица измерения силы тока?
2. Что называется направлением тока?
3. Опишите движение заряженных частиц в металлическом проводнике, направление тока, а также направление напряженности электрического поля.
4. Объясните электрическое сопротивление и электрическое сопротивление.
5. От каких величин зависит электрическое сопротивление проводника?
6. Каков порядок скорости теплового движения и дрейфа электронов в металлических проводниках? Во сколько раз они отличаются в нормальных условиях?
7. Опишите опыты Рике, Мандельштама-Литваксы.
8. Опишите опыт Стюарта-Толмена.
9. Опишите теорию Друде.

**Решение задач:**

1. Сколько кулонов зарядов протекает за 9 минут, если сила тока в цепи равна 0,5 А?

- A) 540 В) 270 С) 27 D) 18

**Дано:**  $I = 0,5 \text{ A}$

$t = 9 \text{ min}$

$I = 0,5 \text{ A}$

$q = ?$

**Решение:** Используем формулу для определения силы тока:

$$I = \frac{q}{t} \rightarrow q = I \cdot t$$

$$q = I \cdot t = 540 \cdot \frac{1}{2} = 270 \text{ C}$$

**Ответ:** В)

2. Если сила тока, проходящего через проводник, линейно возрастала в 10 с от 0 до 5 А, то сколько за это время заряда прошло через поперечное сечение проводника (Кл)?

**Дано:**  $t = 10 \text{ c}$   
 $I_1 = 0 \text{ A}$   
 $I_2 = 5 \text{ A}$

**Решение:** Поскольку сила тока в этом задаче постепенно увеличивается, при определении количества заряда мы получаем среднее значение силы тока.

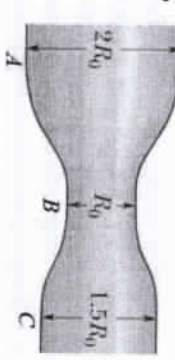
$$q = \bar{I} \cdot t = \frac{I_1 + I_2}{2} \cdot t = \frac{0 + 5}{2} \cdot 10 = 25 \text{ Кл}$$

**Ответ:** 25 Кл

3. По проводнику с различными сечениями на рисунке проходит неизменный ток. В каком соотношении находятся плотности тока в различных сечениях А, В, С?

**Дано:**  $I = \text{const}$   
 $R_A = 2R$   
 $R_B = R$   
 $R_C = 1,5R$   
 $J_A : J_B : J_C = ?$

**Решение:** Определяем поверхность в разрезах. Здесь площадь равно:



$$S_1 = \pi R_1^2 = 4\pi R^2 = 4S$$

$$S_2 = \pi R_2^2 = \pi R^2 = S$$

$$S_3 = \pi R_3^2 = 2,25\pi R^2 = \frac{9}{4}S$$

**Определяем плотность токов:**  $J = \frac{I}{S}$ .

$$J_1 = \frac{I}{S_1} = \frac{I}{4S} = \frac{I}{4}, \quad J_2 = \frac{I}{S_2} = \frac{I}{S} = J, \quad J_3 = \frac{I}{S_3} = \frac{I}{\frac{9}{4}S} = \frac{4I}{9}$$

**Теперь определим соотношение плотности тока.**

$$J_A : J_B : J_C = \frac{I}{4} : \frac{I}{S} : \frac{4I}{9} = \frac{1}{4} : 1 : \frac{4}{9} = 9 : 36 : 16$$

**Ответ:**  $J_A : J_B : J_C = 9 : 36 : 16$ .

§ 11. ДРЕЙФОВОЕ ДВИЖЕНИЕ И НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВНУТРИ ПРОВОДНИКА С ТОКОМ. ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.

*Скорость упорядоченного движения электронов в проводнике:*

При подаче разности потенциалов на концы проводника внутри проводника возникает электрическое поле, и это поле начинает упорядоченно перемещать свободные электроны в одну сторону. В результате наблюдается дрейфовое движение. Расчеты показывают, что скорость дрейфового движения очень мала, так как она будет на 5 порядков меньше скорости теплового движения электронов. Выведем формулу, количественно оценивающую скорость дрейфа электронов внутри проводника (рис. 11.1).

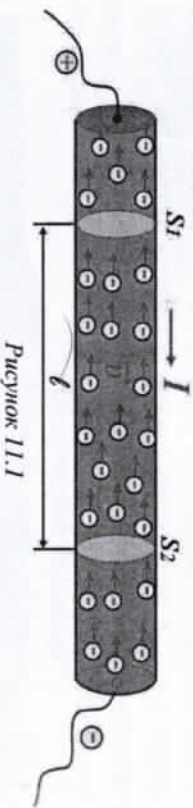


Рисунок 11.1

Электроны, проходящие через поперечную поверхность  $S_1$  проводника в интервале  $\Delta t$ , также проходят через поверхность  $S_2$ , пройдя путь  $l$ . Объем между сечениями  $S_1$  и  $S_2$  будет равен  $V = S\ell = Sg\Delta t$ , а количество электронов в этом объеме будет равно  $N = nV = nSg\Delta t$ . По формуле силы тока можно найти скорость дрейфа.

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{Ne}{\Delta t} = \frac{nSg\Delta t e}{\Delta t} = nSge, \quad \rightarrow \quad g = \frac{I}{enS} = \frac{J}{en}$$

Следовательно, скорость упорядоченного движения электронов внутри проводника определяется по формуле:

$$g = \frac{I}{enS} = \frac{J}{en} \quad (11.1)$$

Здесь:  $n$  — это концентрация свободных электронов в проводнике, величина которой зависит от типа металла;

$S$  — поверхность поперечного сечения проводника;

$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  — элементарная единица заряда.

Давайте рассмотрим эту задачу, чтобы сравнить дрейфовые и тепловые движения электронов в проводнике и правильно понять разницу между ними.

*Задача:* Какова скорость дрейфового движения электронов, если через проводник с площадью поперечного сечения  $1 \text{ мм}^2$  проходит ток  $1 \text{ А}$ ?

Найдем концентрацию свободных электронов в проводнике как  $n = 10^{28} \text{ м}^{-3}$ . Сравните полученный результат со скоростью теплового движения при комнатной температуре.

*Решение:*

Скорость дрейфа электронов по формуле, найденной выше

$$g_{др} = \frac{I}{enS} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{28} \cdot 10^{-6}} = 6,25 \cdot 10^{-4} \text{ м/с} = 0,625 \text{ мм/с}$$

А скорость в тепловом движении согласно молекулярно-кинетической теории равно:

$$g_{теп} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 290}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \approx 115000 \text{ м/с} = 115 \text{ км/с}$$

(отношение этих величин равно:

$$\frac{g_{теп}}{g_{др}} = \frac{115000}{0,000625} \approx 1,84 \cdot 10^8 = 184 \text{ млн.}$$

Следовательно, в приведенном выше задаче скорость электронов в электрическом тепловом движении в 184 миллиона раз больше скорости упорядоченного дрейфа. Но даже при движении с такой большой скоростью они не могут образовывать ток из-за хаотического движение. "Поскольку скорость электронов в упорядоченном движении настолько мала, возникает вопрос, почему, когда мы включаем ток, все лампы всего здания загораются одновременно, или когда мы добавляем ток от трансформатора, электрические лампы во всей деревне загораются мгновенно". Ответ заключается в том, что при добавлении тока внутри проводника возникает электрическое поле, которое распространяется со скоростью света, заставляет электроны внутри всех проводников двигаться почти одновременно.

*Напряженность электрического поля внутри проводника:*

Когда ток проходит через проводник, внутри него возникает электрическое поле, которое перемещает заряженные частицы. Потому что при подключении проводника к розетке возникает электрическое поле, направленное от (+) полюса к (-) полюсу. Электрическое поле заставляет двигаться то есть свободные электроны, перемещаясь из точки с большим потенциалом в точку с меньшим потенциалом. Тогда возникает электрический ток.

Когда разность потенциалов  $U$  на концах проводника длиной  $l$ , движение электронов внутри проводника вызывается электрическим полем  $E$ . Числовое значение напряженности электрического поля имеют направление, противоположное характеру электрона (рис. 10.1).

$$E = \frac{U}{l} = \frac{IR}{l} = \frac{I\rho l}{lS} = \rho \frac{I}{S} = \rho J$$

Великий немецкий физик ом Георг Симон родился 1787 мая 16 года в Эрлангене, королевство Бавария. Закон, выражающий связь между силой тока, напряжением и сопротивлением, он теоретически вывел в физику и доказал в своих экспериментах. В насмешливое время едипица электрического сопротивления называется "ом" в его наставии, а единица проводимости - "Симон", в его фамилии. Закон ом признан учеными всего мира и награжден медалью Копли на заседании Лондонского Королевского общества 30 ноября 1841 года. Он опубликовал свои работы и статьи в 1827 году в одной книге (Die galvanische Kette, Mathem. bearbeitet), затем эта книга была переведена на английский язык в 1841 году, на французский язык в 1847 году и на итальянский язык в 1860 году. Он также занимался жеманями, расценил металл Фурье. Он умер 6 июля 1854 года в Мюнхене, Германия, в возрасте 76 лет.



Ом Георг Симон  
(1787-1854)

Следовательно, численное значение напряженности электрического поля в проводнике с током определяется по формуле:

$$E = \rho \frac{I}{S} = \rho j \quad (11.4)$$

Из приведенной выше формулы видно, что внутри металлических проводников существует напряженность электрического поля, и это поле заставляет свободные электроны дрейфовый движение. Оказывается, величина напряжения будет зависеть от типа материала и поперечной поверхности проводника.

#### Зависимость электрического сопротивления от температуры:

Известно, что отличие проводящих металлов от непроводящих заключается в том, что они легко отдают свои электроны во внешней оболочке. Поскольку электроны в самой внешней электронной оболочке металлов очень слабо связаны с ядром, они легко разрывают связь и скользят по пространству между кристаллическими решетками металла. Эти электроны называются свободными электронами и являются основными носителями заряда при образовании тока. Проводники с большой концентрацией этих свободных электронов имеют хорошую проводимость тока. Свободные электроны также называют электронным газом в классической физике, и считается, что в первом приближении к нему можно применить законы идеального газа. Свободные электроны не затвердевают, а участвуя в тепловом движении, ведут себя хаотично, хаотично, рассматриваются как молекулы при столкновении с атомами в узлах кристалла. При повышении температуры проводника увеличивается и хаотическое движение свободных электронов. В результате этот хаотический движение начинает мешать их упорядоченному движению в одну сторону,

образуя линию. Следовательно, из этого следует, что при повышении температуры проводника его электрическое сопротивление увеличивается, а непроводящим способностью уменьшается. Расчеты показывают, что сопротивление и удельное сопротивление линейно связаны с температурой.

Зависимость удельного сопротивления и электрического сопротивления от температуры будет следующей:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t), \quad R = R_0 (1 + \alpha t) \quad (11.5)$$

Здесь  $\rho_0$ ,  $R_0$  - удельное сопротивление и электрическое сопротивление проводника при температуре  $0^\circ\text{C}$ ;  $\rho$ ,  $R$  - удельное сопротивление и электрическое сопротивление проводника при температуре  $\rho^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления  $[\alpha] = [^\circ\text{C}^{-1}]$ .

Изменение  $\alpha$  во всех металлах положительное, так как при нагревании их сопротивление увеличивается. Температурные коэффициенты чистых металлов мало отличаются друг от друга, и их можно считать равными примерно  $0,004 \text{ K}^{-1}$  (около коэффициентов линейного увеличения объема и давления в идеальных газах  $\frac{1}{273^\circ\text{C}}$ ). Удельное сопротивление металлических сплавов значительно больше, чем у чистых металлов, а температурные коэффициенты несколько меньше. Поскольку некоторые сплавы имеют только минимальные температурные коэффициенты, их удельное сопротивление практически не зависит от температуры.

Когда при решении задач задается значение сопротивления при одной температуре, отличной от  $0^\circ\text{C}$ , и задается значение при другой температуре. Чтобы решить эту задачу, сначала нужно найти сопротивление проводника при температуре  $t_1$  от  $R_1 = R_0 (1 + \alpha t_1)$  до его сопротивления при  $0^\circ\text{C}$ ,  $R_0 = \frac{R_1}{1 + \alpha t_1}$  и

установить его на сопротивление  $R_2$  при температуре  $t_2$ , а затем

$$\text{формулуем } R_2 = R_0 (1 + \alpha t_2) = \frac{R_1}{1 + \alpha t_1} (1 + \alpha t_2) = \frac{1 + \alpha t_2}{1 + \alpha t_1} R_1.$$

Следовательно, если сопротивление проводника при температуре  $t_1$  равно  $R_1$ , то сопротивление проводника при температуре  $t_2$  равно  $R_2$ :

$$R_2 = \frac{1 + \alpha t_2}{1 + \alpha t_1} R_1 \quad (11.6)$$

Сопротивление любого электроинструмента, работающего при сильном токе, в момент его подключения к току и величина силы тока, протекающего через него, отличаются от таковых в его рабочем состоянии.



При работе в рабочем состоянии сопротивление электрониструмента увеличивается, а сила тока, проходящего через него, уменьшается. Эта разница может быть даже в несколько раз.

В некоторых случаях задается вопрос о том, во сколько раз увеличилось сопротивление проводника и на сколько градусов он нагревается. Давайте разберем этот случай. Из этого следует, при  $t^{\circ}C$  что сопротивление проводника  $R = R_0(1 + \alpha t)$ ,  $1 + \alpha t = \frac{R}{R_0} = k$

Отсюда следует, что при нагреве проводника при температуре  $0^{\circ}C$  до следующих градусов его сопротивление увеличивается в  $k$  раз.

$$t = \frac{k-1}{\alpha} \quad (11.7)$$

Следует напомнить, что во сколько раз увеличивается сопротивление проводника при его нагреве, во столько раз уменьшается сила тока, проходящего через него. Так получается, что сила тока в проводниках (особенно в электрических лампах и пластинчатых спиралях) в рабочем режиме будет меньше, чем в холодном. Термометры сопротивления изготавливаются на основе зависимости сопротивления металлов от температуры. Их также называют термометрами сопротивления. Они позволяют измерять температуру с точностью до одной тысячной доли градуса.

Следует также отметить, что для угля и электролитов, а также для полупроводников (с которыми мы познакомимся в следующей главе) коэффициент  $\alpha$  является отрицательным. Потому что при нагревании их сопротивление уменьшается.

Оказалось, что удельное сопротивление в некоторых чистых металлах резко возрастает до нуля при температурах, близких к абсолютному нулю (рис.11.2). Это явление получило название сверхпроводимости и было впервые открыто в 1911 году голландским физиком Камерлинг-Оннесом на основе эксперимента. Было установлено, что при охлаждении ртути в жидком гелии первоначально сопротивление ртути уменьшалось по формуле  $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$ , а когда температура достигала  $4,1 K$ , то скачком падало сразу до нуля.

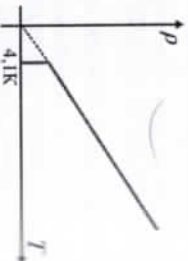


Рисунок 11.2

Если в кольцеобразном проводнике, находящемся в сверхпроводящем состоянии, создается ток, то значение тока в нем остается неизменным как можно дольше. Камерлинг-Оннес наблюдал, что даже после прекращения

действия ЭДС на свинец при температуре  $7 K$  в течение  $4$  суток проходили сверхпроводящий ток.

**Вопросы по теме:**

1. Движение движущие заряженные частицы в металлическом проводнике, направление тока, а также направление направленности электрического поля.
2. Напишите формулу скорости дрейфового движения электронов в проводнике?
3. Напишите формулу зависимости электрического сопротивления от вида материала и геометрических размеров.
4. Напишите формулу зависимости электрического сопротивления от температуры.
5. Связанные причины увеличения электрического сопротивления при повышении температуры.
6. Что такое сверхпроводимость? Кто его основатель?

**Решение задач:**

1. Сколько Ом имеет сопротивление алюминиевая проволока массой  $0,27$  кг с поперечной сечения  $2,8 \text{ мм}^2$ ? Плотность алюминия  $2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , удельное сопротивление  $2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

А) 28 В) 0,36 С) 3,6 Д) 28

Дано:

$$m = 0,27 \text{ кг} \quad R = \rho \frac{l}{S} \quad (1), \quad V = S \cdot l = \frac{m}{\rho} \quad (2),$$

$$S = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$\rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_0 = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$R = ? \quad R = 2,8 \cdot 10^{-8} \frac{0,27}{2,7 \cdot 10^3 \cdot 2,8 \cdot 10^{-12}} = 0,36 \text{ Ом}$$

Ответ: В) 0,36 Ом

2. Амперметр, подключенный к реостату из никелевой проволоки поперечным сечением  $1 \text{ мм}^2$ , показывает  $2,62 \text{ А}$ , а вольтметр  $220 \text{ В}$  (рис.11.3)  $10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ). Какова длина провода реостата (м)?

Дано:

$$S = 1 \text{ мм}^2 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad R = \rho \frac{l}{S} \quad (1) \quad R = \frac{U}{I} \quad (2) \quad 2 \Rightarrow 1$$

$$I = 2,62 \text{ А} \quad U = \rho \frac{l}{S} \quad (3) \quad l = \frac{U \cdot S}{\rho \cdot I}$$

$$\rho_0 = 42 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$l = \frac{220 \cdot 10^{-6}}{42 \cdot 10^{-6} \cdot 2,62} = 200 \text{ м}$$

Ответ: 200 м

3. Каково напряжение электрического поля (В/м) в медном проводе с поперечным сечением грани  $1 \text{ м}^2$ , через который проходит переменный ток  $20 \text{ А}$ ? Удельное сопротивление меди  $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

А) 0,17 В) 0,34 С) 1,7 Д) 3,4 Е) 17

Дано:

$$I = 20 \text{ А}$$

$$S = 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$\rho_0 = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$E = ?$$

Ответ: 0,34 В/м

Решение:

$$E = \frac{U}{l}, \rightarrow U = El. \rightarrow I = \frac{US}{\rho l} = \frac{ES}{\rho} \quad E = \frac{I\rho}{S}$$

$$E = \frac{20 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8}}{10^{-6}} = 34 \cdot 10^{-2} = 0,34 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

## § 12. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Существует два типа соединений сопротивлений:

1) последовательное соединение;

2) параллельное соединение. Давайте посмотрим, как рассчитывается сила тока, напряжение и общее сопротивление в таких соединениях.

**Последовательное подключение проводников:**

Соединение сопротивлений, как показано на рисунке ниже, представляет собой последовательное соединение, при котором к концу сопротивления 1 присоединяют сопротивление 2, к концу сопротивления 2-сопротивление 3 и т.д., а к полюсам (+) и (-) источника постоянного тока соответственно подключают сопротивления 1 и n (рис.12.1).

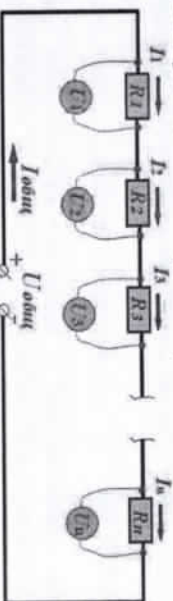


Рисунок 12.1

При последовательном соединении сопротивлений начало сопротивления 1 (точка входа) соединяется с полюсом источника (+), а конец последнего сопротивления (точка выхода) соединяется с полюсом источника (-) (рис.12.1). Заряд, выходящий из (+) полюса источника (фактически, электрон выходит из (-) полюса источника) 1, 2, 3, ... проходит через n-сопротивления, электроны достигают (-) полюса источника (тогда как на самом деле электроны достигают (+) полюса источника) в полной мере. Поскольку нет разветвления, в каждом сопротивлении протекает равное количество заряда в единицу времени. Следовательно, силы тока в них равны

$I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n$ , то есть об этом также можно узнать по одному и тому же выводу их показаний при подключении амперметра после каждого сопротивления потребителя.

Это потому, что общее напряжение, подаваемое из внешнего источника, распределяется по всем сопротивлениям. Об этом также можно узнать из того, что сумма показаний вольтметров  $U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$ , подаваемых к каждому потребителю параллельно сопротивлению, на выходе равна напряжению источника тока.

В то время как общее сопротивление имеет вид:

$$U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n \rightarrow IR = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 + \dots + I_n R_n \quad /: I \rightarrow R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

Узнав образом, формулы общего тока, общего напряжения и общего электрического сопротивления при последовательном соединении сопротивлений следующие:

$$\begin{aligned} I_{\text{общ}} &= I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n \\ U_{\text{общ}} &= U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n \\ R_{\text{общ}} &= R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \end{aligned} \quad (12.1)$$

Энергопотенциал сил тока является следствием закона сохранения заряда. А то, что напряжение распределяется на потребительские сопротивления, является следствием закона сохранения энергии. Из приведенной выше формулы видно, что общее сопротивление, создаваемое при последовательном соединении сопротивлений, оказывается даже больше, чем наибольшее сопротивление в заданных сопротивлениях.

Если последовательно соединить одинаковые сопротивления в сеть постоянного тока, то получим, что каждое из них равно  $R$ . Будет общее сопротивление  $R_{\text{общ}} = R + R + R + \dots + R = nR$ .

Следовательно, общее сопротивление, создаваемое при последовательном соединении n одинаковых сопротивлений, будет:

$$R_{\text{общ}} = nR \quad (12.2)$$

Чтобы последовательно соединено n сопротивлений, из которых нам нужно определить падение напряжения на произвольном сопротивлении 1, или 2, или 3. В общем случае среди этих сопротивлений есть одно произвольное, т.е. k-сопротивление. Падение напряжения на произвольном потребителе равно произведению этого потребителя и проходящего через него тока (рис.12.2).

$$U_k = I_k \cdot R_k = I_{\text{общ}} \cdot R_k = \frac{U_{\text{общ}} \cdot R_k}{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_k} \quad U$$

Следовательно, падение напряжения на произвольном  $k$ - ( $1 < k < n$ ) сопротивлении и резисторов, последовательно подключенных к источнику напряжения, будет следующим (рис. 12.2):

$$U_k = \frac{R_k}{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n} U \quad (12.3)$$

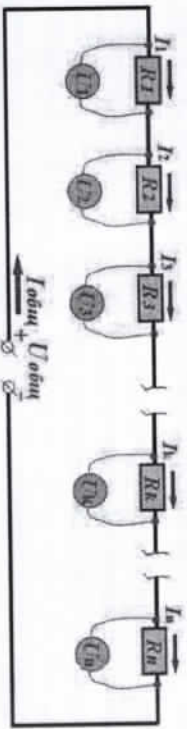


Рисунок 12.2

Из формулы видно, что падение напряжения будет больше при большом сопротивлении, меньше при малом сопротивлении, т. е. падение напряжения будет происходить в зависимости от его вклада в формирование общего сопротивления. В каком соотношении находятся сопротивления, в таком же соотношении найдется и падающие на них напряжения.

$$U_1 : U_2 : U_3 : \dots : U_n = R_1 : R_2 : R_3 : \dots : R_n \quad (12.4)$$

Приведенная выше формула для двух сопротивлений можно написать следующим образом:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (12.5)$$

Наиболее часто встречающимся случаем при решении задач является задача определения падения напряжения на каждом из двух последовательно соединенных сопротивлений. Мы можем легко определить этот вопрос по формуле для определения падения напряжения при произвольном  $k$ - сопротивлении, с которой мы ознакомились выше.

$U$  подключается к источнику напряжения последовательно  $R_1$  и  $R_2$  падении напряжения на каждом из сопротивлений равны (рис. 12.3):

$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U, \quad U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \quad (12.6)$$

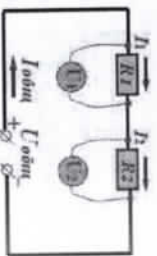


Рисунок 12.3

#### Параллельное соединение проводников:

Соединение сопротивлений, как показано на рисунке ниже, является параллельным соединением. При этом один конец всех сопротивлений

непрямую связан с (+) полюсом источника, а 2-й конец-непосредственно с (-) полюсом источника.

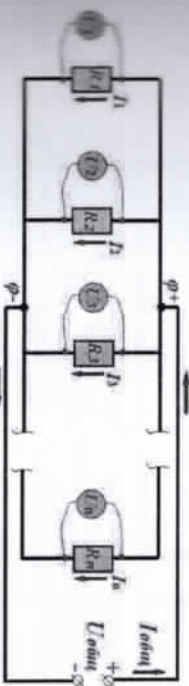


Рисунок 12.4

1-й и верхний конец всех сопротивлений подключен непосредственно к (+) полюсу источника. Следовательно, на всех этих концах образуется потенциал  $\phi_1$  равный потенциалу полюса (+) одного и того же источника. Нижние 2-концы всех сопротивлений подключены непосредственно к (-) полюсу источника. Следовательно, на всех этих концах образуется  $\phi$ -потенциал, равный потенциалу полюса (-) одного и того же источника (рис. 12.4). Разность потенциалов в каждом сопротивлении будет равна между собой, и эта разность потенциалов будет равна напряжению источника, то есть  $\phi_1 - \phi = U$ . Следовательно, напряжения на всех сопротивлениях одинаковы и равны напряжению источника  $U_{общ} = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n$ . Об этом также можно узнать по одному и тому же выводу показаний вольтметра, подключенного параллельно к сопротивлению каждого потребителя.

Вряд, выходящий из (+) полюса источника (на самом деле электроны выходят из (-) полюса источника), разбивается на все сопротивления и распределяется, и, как только он выходит из нижних концов сопротивлений, он стабилизируется и достигает (-) полюса источника (на самом деле электроны достигают (+) полюса источника). Отсюда сила тока после того, как заряд в параллельном участке будет распределен по всем сопротивлениям будет  $I_{общ} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$ . Это также можно узнать по тому, что сумма показаний вольтметров, подключенных после каждого сопротивления потребителей, равна показаниям амперметра, подключенного к его параллельной части. Это результат закона сохранения заряда.

Общее сопротивление системы имеет вид:

$$I_{общ} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n, \rightarrow \frac{q_{общ}}{R_{общ}} = \frac{q_1}{R_1} + \frac{q_2}{R_2} + \frac{q_3}{R_3} + \dots + \frac{q_n}{R_n} / q, \rightarrow \frac{1}{R_{общ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Таким образом, формулы общей силы тока, общего напряжения и общего сопротивления при параллельном соединении сопротивлений следующие:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{общ}} &= I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \\
 U_{\text{общ}} &= U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n \\
 \frac{1}{R_{\text{общ}}} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}
 \end{aligned}$$

(12.7)

Общее сопротивление, создаваемое при параллельном соединении сопротивлений, также меньше наименьшего сопротивления в заданных сопротивлениях.

Если соединить  $n$  одинаковые сопротивления параллельно сети переменного тока, то получим, что каждое из них равно  $R$ . В то время как общее сопротивление имеет вид:

$$R_{\text{общ}} = \frac{R}{n}$$

(12.8)

Следовательно, если  $n$  одинаковых сопротивлений подключены параллельно, общее сопротивление будет следующим:

$$\frac{1}{R_{\text{общ}}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \dots + \frac{1}{R} = \frac{n}{R} \rightarrow R_{\text{общ}} = \frac{R}{n}$$

Если сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  подключены параллельно, общее сопротивление будет следующим:

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

(12.9)

Пусть параллельно соединено  $n$  сопротивлений, из которых нам нужно определить силу тока в произвольном сопротивлении 1, или 2, или 3. В общем случае среди этих сопротивлений есть одно произвольное, т. е.  $k$ -сопротивление. Сила тока, проходящего через произвольный потребитель, равна отношению падения напряжения на этом потребителе к сопротивлению этого потребителя по закону Ома (рис. 12.5).

$$I_k = \frac{U_k}{R_k} = \frac{U_{\text{общ}}}{R_k} = \frac{I_{\text{общ}} R_{\text{общ}}}{R_k} = \frac{1}{R_k \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)} I$$

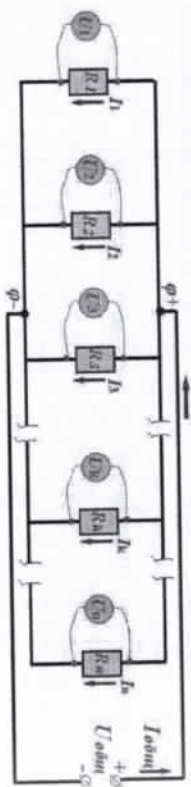


Рисунок 12.5

Следовательно, если сила тока в неразветвленном участке цепи равна  $I$ , то сила тока в произвольном  $k$ - ( $1 < k < n$ ) сопротивлении  $n$  резисторов, подключенных параллельно источнику, будет равна:

$$I_k = \frac{1}{R_k \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)} I$$

(12.10)

Из формулы видно, что сила тока больше при малом сопротивлении, а при большом-меньше, т. е. ток в неразветвленном участке распределяется обратно пропорционально сопротивлениям. В каком бы соотношении ни находились сопротивления, токи, проходящие через них, находятся в обратном соотношении.

$$I_1 : I_2 : I_3 : \dots : I_n = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3} : \dots : \frac{1}{R_n}$$

(12.11)

А для две проводников будет в следующем виде:

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{R_2}{R_1}$$

(12.12)

При решении задач чаще всего мы сталкиваемся с тем, что задается сила тока, проходящие через каждое из двух параллельно соединенных сопротивлений.

Возникает вопрос приведенной выше формулой. Силы тока равно:

$$I_1 = \frac{1}{R_1 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} I = \frac{R_1 R_2}{R_1 (R_1 + R_2)} I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \quad \text{и}$$

$$I_2 = \frac{1}{R_2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} I = \frac{R_1 R_2}{R_2 (R_1 + R_2)} I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$

Следовательно, если сила тока на неразветвленном участке цепи равна  $I$ , то силы тока, проходящие через каждое из сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  соединенных параллельно источнику, будут следующими (рис. 12.6)

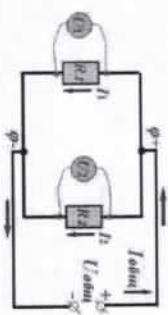


Рисунок 12.6

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I, \quad I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$

(12.13)

**Нахождение результирующего сопротивления в различных цепях:**

Из основы электростатика нам известно, что при касании различных заряженных тел в них происходит ток обмена зарядами до тех пор, пока их потенциалы не станут равными. Другими словами, электрическое поле стремится переместить заряд из точки с большим потенциалом в точку с меньшим потенциалом, в то время как при выравнивании потенциалов

движение зарядов не происходит. Потому что в точке с равным потенциалом на заряд действует кулоновская сила, направленная в противоположную сторону и равная по величине. Зная все перечисленное, можно легко рассчитать и суммарные сопротивления электрических цепей, имеющих сложную структуру. Для этого можно найти на схеме точки с одинаковыми потенциалами и сложить их, а можно сделать схему попроще, отделив от одной точки две точки с равными потенциалами. На рисунке 12.7 ниже представлены такие сложные схемы и примеры, как приведение их к более простой эквивалентной схеме и определение общего электрического сопротивления путем разделения их на точки с равными потенциалами. В этом случае мы предполагаем, что между двумя точками есть один проводник, и мы называем его звеном.

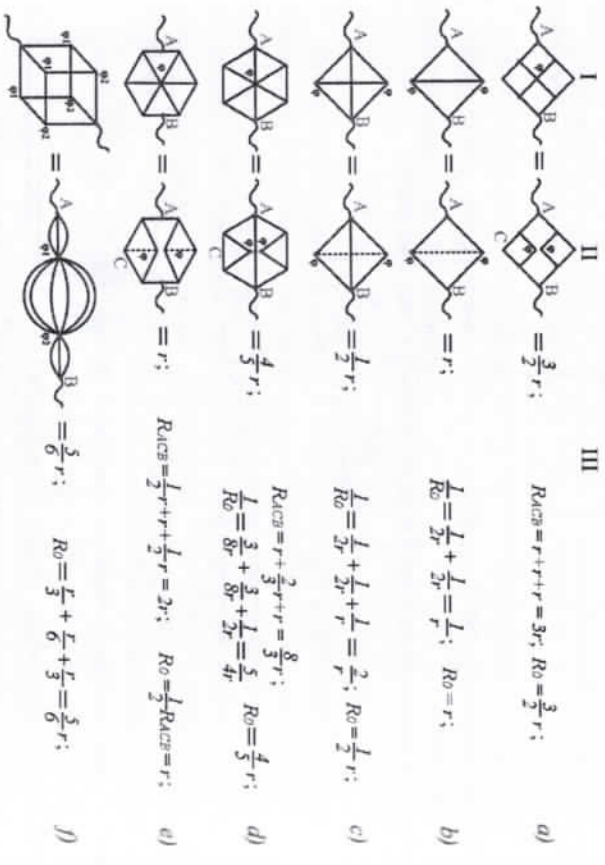


Рисунок 12.7

Изображено на рисунке 12.7 выше, где сопротивление каждого звена равно  $r$ , а нахождение результирующего полного сопротивления  $R$  различных геометрических фигур из проволоки дано на самом рисунке. Поскольку схемы соединений в каждой из фигур на рисунке сложны, мы используем симметрию для их решения. Известно, что потенциал заряда течет из большей точки в точку с малым потенциалом. Если потенциалы двух точек равны, то при соединении этих точек или удалении существующего звена между ними сопротивление схемы не изменяется. На рисунке показаны

различные формы с числом 1, упрощенная форма с числом 2, а с числом 3 - нахождение полного сопротивления  $R_0$ , т. е. решение задачи. Точки с равными потенциалами обозначаются  $\phi$ .

**Вопросы по теме:**

1. Что называется последовательным соединением? Какова общая сила тока, напряжения и сопротивления в последовательном соединении?
2. Что называется параллельным соединением? Какова общая сила тока, напряжения и сопротивления в параллельном соединении?
3. В каком соотношении находятся напряжения на последовательно соединенных сопротивлениях? Запишите надежные напряжения, на каждое из двух сопротивлений.
4. Какими будут силы тока, проходящие через каждое из параллельно соединенных сопротивлений? Запишите силы тока, проходящие через каждое из двух сопротивлений.

**Решение задачи:**

1. В неочевидную неизменную напряжения последовательно подключались два термистора с равными сопротивлениями. Во сколько раз увеличилась сопротивление (термистора), если в результате изложения одного из термисторов падение напряжения на нем увеличилось в 1,5 раза?

- A) 1,5 B) 2 C) 6 D) 4 E) 3

**Решение:**

1) В случае:

$$R_{\text{sum}} = R_1 + R_2 = 2R \quad U_0 = IR_{\text{sum}} = 2IR$$

$$U_1 = IR_1 \quad U_2 = IR_2$$

2) В случае:

$$U_1' = IR_1' \quad U_2 = IR_2$$

$$U_1' = 1,5U_1 \Rightarrow IR_1' = 1,5IR_1 \quad R_1' = 1,5R$$

Ответ: A)

2. Сопротивления  $2R$  и  $R$  соединены в цепи последовательно. Напряжение при подключении к сопротивлению  $2R$  показывает в 1,5 раза больше, чем при подключении к сопротивлению  $R$ . Во сколько раз сопротивление вольтметра больше сопротивления  $R$ ? (Сила тока, проходящий через источник, неизменна.)

- A) 3 B) 2 C) 1,5 D) 4 E)  $\sqrt{11}$

**Дано:**  
 $R_V = 2R$   
 $R_2 = R$   
 $U_1 = 1,5U_2$

**Решение:**  
 1)  $R_{\text{общ1}} = \frac{2R \cdot R}{R_V + 2R}$   $U_1 = IR_{\text{общ1}}$ ;    2)  $R_{\text{общ2}} = \frac{R_V \cdot R}{R_V + R}$   $U_2 = IR_{\text{общ2}}$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{IR_{\text{общ1}}}{IR_{\text{общ2}}} = \frac{2R_V R (R_V + R)}{(R_V + 2R) R} = \frac{2R_V + 2R}{R_V + 2R} = 3$$

$$4R_V + 4R = 3R_V + 6R, \rightarrow 2R = R_V, \rightarrow \frac{R_V}{R} = 2$$

**Ответ:** В) 2

3. Вольтметр с внутренним сопротивлением 2800 Ом при подключении к электросети показывал напряжение 220 В. Сколько Ом сопротивлений подключено к вольтметру последовательно, он показывает 112 В?

**Дано:**  
 $R_V = 2800 \text{ Ом}$   
 $U_V = 112 \text{ В}$   
 $U = 220 \text{ В}$   
 $R_{sh} = ?$

**Решение:**  
 $U = U_V + U_{sh}$   
 $I = \frac{U_{sh}}{R_{sh}} = \frac{U - U_V}{R_{sh}}, \rightarrow R_{sh} = \frac{108}{112} \cdot 2800 = 2700 \text{ Ом}$   
 $R_{sh} = \frac{(U - U_V) R_V}{U_V}$   
**Ответ:** 2700 Ом

**§ 13. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ. УВЕЛИЧЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ**

**Амперметр. Увеличение предела измерения с помощью амперметра:**

Сила тока измеряется прибором амперметра (рис.13.1). Амперметр подключается последовательно к сопротивлению. Цель измерения силы тока с помощью амперметра состоит в том, чтобы получить фактическую силу тока, используя амперметр, независимо от того, какой процесс происходит, когда амперметр не подключен, чтобы иметь почти такой же процесс после подключения, другими словами. В момент, когда амперметр не подключен, в сети будет сила тока  $I_1 = \frac{U}{R}$ , а при подключении амперметра-сила тока  $I_2 = \frac{U}{R + r_A} = \frac{R}{R + r_A} \cdot \frac{U}{R} = \frac{R}{R + r_A} \cdot I_1$  (рис.13.2). Поскольку амперметр также имеет внутреннее сопротивление, оно всегда равно  $I_2 < I_1$ . Потому что всегда будет  $\frac{R}{R + r_A} < 1$ . Поэтому мы должны стремиться не преувеличивать разницу между силами тока с разницей между токами  $I_1$  и  $I_2$ , то есть иметь резульат  $I_2 \approx I_1$ , даже если  $I_2 < I_1$ . А для того, чтобы не преувеличивать разницу между силами тока с разницей  $I_1$  и  $I_2$ , внутреннее сопротивление амперметра  $r_A$  нужно будет выбирать как можно меньше ( $r_A < R$ ). Амперметр никогда не может быть подключен параллельно к сети постоянного тока. При параллельном

подключении амперметра к сопротивлению, из-за того, что его внутреннее сопротивление намного меньше, через него проходит гораздо больший ток, и он, не выдержав этого тока сам, может сгореть.

Во многих случаях различные амперметры необходимы для их измерения при работе с различными силами тока. Например, при измерении больших токов используется амперметр, а при измерении малых токов-миллиампер. Если в нашем распоряжении только один, скажем, только миллиамперметр, то что нам делать?

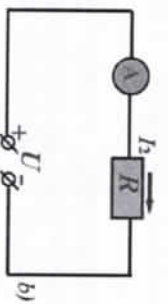
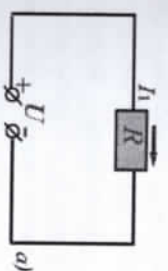


Рисунок 13.1

Рисунок 13.2

При подключении миллиамперметра к большой силе тока прибор сгорает. Чтобы достичь нашей цели, нам нужно будет увеличить предел измерения нашего выбранного миллиамперметра. Для увеличения предела измерения амперметра к нему параллельно подсоединяют шунт. Приведем сопротивление дополнительного соединительного шунта. Ток, проходящий через амперметр, будет силой  $I_A = \frac{R_m}{R_m + r_A} \cdot I$ . Из этого получается.

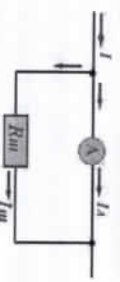
$$n = \frac{I}{I_A} = \frac{R_m + r_A}{R_m}, \rightarrow n R_m = R_m + r_A, \rightarrow R_m = \frac{r_A}{n - 1}$$

Следовательно, чтобы увеличить предел измерения амперметра, сопротивление шунта, который будет подключен дополнительно, будет следующим:

$$R_m = \frac{r_A}{n - 1}, \quad n = \frac{I}{I_A} \quad (13.1)$$

Здесь  $n$  - коэффициент чувствительности.

Рисунок 13.3



$r_A$  - внутреннее сопротивление амперметра;

$R_m$  - сопротивление шунта.

Как видно из приведенной формулы, сопротивление шунта всегда должно внутреннего сопротивления амперметра, т. е. до тех пор, пока  $R_m < r_A$ .  $I$  в черту шунт проходит большая часть тока  $I$  в неравновесном участке, а через амперметр должен проходить только ток, на который он рассчитан (не предельно большой индицирующий показатель амперметра). Только тогда можно будет вывести амперметр от выхода из строя. Например, амперметр

предназначен для измерения силы тока только до  $I_A=10$  мА, и если его подключить к току  $I=100$  мА при силе тока в сети, то сопротивление шунта нужно будет выбирать таким образом, чтобы через амперметр проходил целевой ток 10 мА, а через шунт-оставшийся ток 90 мА. Только тогда мы сможем спасти амперметр от стора.

**Вольтметр. Увеличение предела измерения с помощью вольтметра:**

Напряжение измеряется прибором вольтметра (рис.13.4). Вольтметр подключается параллельно сопротивлению. Внутреннее сопротивление вольтметра выбирают максимально большим. Обычно внутреннее сопротивление вольтметра выбирают значительно большим, чем сопротивление потребителей. Вольтметр подключен параллельно сопротивлению, то напряжение на нем будет равно напряжению источника. Внутреннее сопротивление по формуле должно быть достаточно большим  $R_v = \frac{U^2}{R_v}$ , чтобы в вольтметре не выделялась большая мощность и не выводился из строя прибор, а также не превышалась потери энергии. Другими словами, внутреннее сопротивление вольтметра выбирается таким образом, чтобы оно было значительно больше, чем сопротивление электрооборудования, для использования которого оно предназначено, например, сопротивление электроприборов, используемых в быту. Внутреннее сопротивление вольтметра будет записано в его паспорте (рис.13.5).



рис 13.4

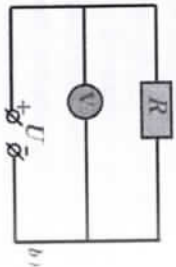
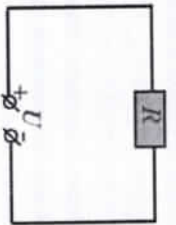


Рисунок 13.5

Вольтметр никогда не может быть подключен последовательно к сети постоянного тока. При этом из-за того, что его внутреннее сопротивление намного больше, он сам поглощает все напряжение источника, а напряжение на потребителя остается очень маленьким. В результате рабочий процесс потребителя полностью меняется. Например, если электрическую лампу и вольтметр подключить последовательно к сети тока 220 В, то на вольтметр падает напряжение 220 В, а на лампу-20 В, и лампа тускло горит.

В большинстве случаев при работе с разными напряжениями для их измерения нужны разные вольтметры. Если в нашем распоряжении есть только один, скажем, вольтметр, предназначенный для измерения средних напряжений, то что нам делать?

При подключении вольтметра к большему напряжению прибор стора и выводит из строя. Для достижения цели нам нужно будет увеличить предел измерения выбранного нами вольтметра. Чтобы увеличить предел измерения вольтметра, к нему последовательно подключают дополнительные сопротивления. Давайте создадим дополнительное подключаемое сопротивление. Напряжение на вольтметре будет равно  $U_v = \frac{r_v}{R_q + r_v} \cdot U$ . Из этого получается.

$$n = \frac{U}{U_v} = \frac{R_q + r_v}{r_v}, \rightarrow n r_v = R_q + r_v, \rightarrow R_q = (n-1)r_v$$

Следовательно, сопротивление, которое будет дополнительно подключено к вольтметру для увеличения предела измерения, будет равно:

$$R_{\text{вн}} = (n-1)r_v, \quad n = \frac{U}{U_v} \quad (13.11)$$

Где  $n$  - коэффициент чувствительности,

$R_v$  - внутреннее сопротивление вольтметра,

$R_{\text{вн}}$  - подключаемое дополнительное сопротивление.

Как видно из приведенной выше формулы, дополнительное сопротивление всегда больше внутреннего сопротивления вольтметра, т. е. до тех пор, пока оно будет  $R_q > r_v$ . Потому что большая часть напряжения  $U$  в цепи падает на дополнительное сопротивление, а на вольтметр должно падать только номинальное (не превышающее наибольшего значения вольтметра) напряжение. Только тогда можно будет спасти вольтметр от стора. Например, вольтметр предназначен для измерения напряжения только до  $U_v=100$  В. Если его необходимо подключить к источнику с напряжением  $U=1000$  В, то сопротивление дополнительного резистора следует выбрать таким образом, чтобы на вольтметр падало номинальное напряжение 100 В, а оставшаяся напряжение 900 В - на дополнительное сопротивление. Только тогда мы сможем спасти вольтметр от стора.

Теперь давайте приблизительно, хотя и количественно, оценим внутреннее сопротивление амперметра, вольтметра и величинны сопротивлений, используемых для увеличения предела их измерения. Итого, бытовые электроприборы (лампа накаливания, телевизор, кондиционер, кондиционер, пылесос и др.) электрическое сопротивление лампы накаливания мощностью 100 Вт равно 484 Ом. Выберем электрический

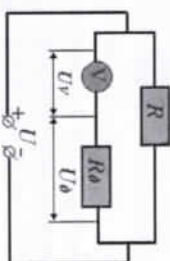


Рисунок 13.6

прибор с сопротивлением  $R=100 \text{ Ом}$ . Для измерения силы тока в нем сопротивление амперметра, к которому он подключен, должно быть в сто раз меньше. Итак, давайте предположим, что  $r_A = R/100 = 1 \text{ Ом}$ . Если необходимо увеличить предел измерения и этого амперметра, то сопротивление шунта, который к нему подключен, будет еще меньше. Допустим, если мы хотим подключить в 10 раз больший ток, то сопротивление шунта должно быть в 9 раз меньше, т. е. Будет  $R_{ш} = r_A / 9 = 1/9 \text{ Ом}$ . Теперь, если мы хотим измерить напряжение в электрическом приборе с сопротивлением  $R=100 \Omega$ , сопротивление вольтметра, подключаемого к нему, должно быть в сто раз больше. Итак, давайте предположим, что  $r_V = 100R = 10 \text{ кОм}$ . Если необходимо увеличить предел измерения даже этого вольтметра, то дополнительное сопротивление, которое будет подключено к нему, будет еще больше. Допустим, если мы хотим подключить в 10 раз большее напряжение, то дополнительное сопротивление должно быть в 9 раз больше, т. е. Будет  $R_q = 9r_V \approx 90 \text{ кОм}$ . Для сравнения, внутренние сопротивления амперметров и вольтметров

$$\frac{r_V}{r_A} = \frac{100R}{R/100} = 10^4 = 10\,000$$

раз отличается

А сопротивления, которые подключаются к амперметру и вольтметру

$$\frac{R_{ш\text{м}}}{R_m} = \frac{9r_V}{r_A / 9} = 81 \frac{r_V}{r_A} = 81 \cdot 10^4 = 810\,000$$

раз отличается.

**Реостат. Изменения силы тока и напряжения с помощью реостата:**

Устройство, предназначенное для изменения силы тока или напряжения, называется реостатом.



Рисунок 13.7

Реостаты будут состоять из пучка никелевых или хромовых проводов с определенным сопротивлением, намотанных на цилиндр, в зависимости от применения. На рисунках 13.7-а,б представлен общий вид и схематическое изображение одного из реостатов с роликовым контактом. Реостаты подключаются к цепи в виде регулятора для изменения силы тока, а потенциометр- для изменения напряжения.



Рисунок 13.8

Если реостат последовательно присоединить к цепи зажимами 2-3 или 1-3 и изменить его сопротивление сдвигом 4 контактов, то сила тока в цепи изменится (рис.13.8). В этом случае в качестве регулятора используется реостат.

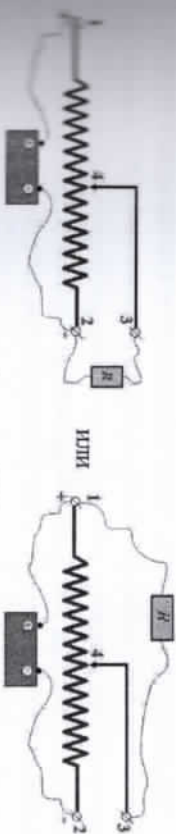


Рисунок 13.9

При подключении реостата к цепи в виде потенциометра его зажим 1-2 подключают к источнику, а зажим 2-3 или 1-3 - к потребителю, изменяя напряжение изменением положения скользящего контакта 4 (рис.13.9).

Наибольшее сопротивление и допуск каждого реостата-это наибольшая допустимая сила тока, которая будет записана в паспорте реостата.

**Вопросы по теме:**

1. Какова функция амперметра? Как он подключается к цепи переменного тока и почему?
2. Как увеличивается предел измерения амперметра? Напишите формулу для определения сопротивления шунта, к которому он подключается.
3. Какова функция вольтметра? Как он подключается к цепи переменного тока и почему?
4. Как увеличивается предел измерения вольтметра? Напишите формулу для определения дополнительного сопротивления, к которому будет подключаться.
5. Что такое коэффициент чувствительности? Запишите его формулу, выразившее через силу тока или напряжение.

**Решение задач:**

1. Сопротивление R шунта в 5 раз меньше сопротивления амперметра. Если амперметр показывает ток 100 мА, то какова сила тока I (мА) в цепи шунта?



<b>Дано:</b>	$R_A$	<b>Решение:</b>	$R_{ш} = R$
	$R = \frac{R_A}{5}$		$I_A R_A = I_{ш} R_{ш}$
	$I_A = 200 \text{ мА}$		$I_A R_A = \frac{R_A R_{ш}}{n-1}$
			$I_{ш} = 5 I_A$
			$I = I_A + I_{ш} = 6 I_A$
			$I = 6 \cdot 100 = 600 \text{ мА}$

Ответ: 600 мА

2. Если к амперметру подключить один из двух одинаковых шунтов, то его значение разведет увеличится в 2 раза. Во сколько раз увеличится значение разведет, если два шунта соединить параллельно амперметру?

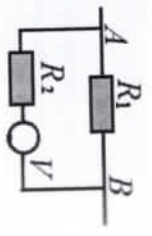
А) 3 В) 4 С) 5 Д) 2,5 Е) 1,5

<b>Дано:</b>	$I_{ш} = I_A$	<b>Решение:</b>	$I = n I = I_A + I_{ш} + I_{ш} = 3 I_{ш}$
	$I_n = 2 I_A$		$I_A = \frac{I}{3}$
	$n_1 = 2$		$n_2 = \frac{I}{I_A} = 3$
	$n_2 = ?$		

Ответ: А) 3

3. Во сколько раз увеличивается предел измерения вольтметра, если в схеме  $R_1 = 800 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 1000 \text{ Ом}$  и общее сопротивление этой цепи равно  $480 \text{ Ом}$ ?

<b>Дано:</b>	$R_1 = 800 \text{ Ом}$	<b>Решение:</b>	$I = \frac{U_V}{R_V}, U = U_2 + U_U, R_V = 200 \text{ Ом}$
	$R_2 = 1000 \text{ Ом}$		$I = \frac{U_V + U_{ш}}{R_V + R_{ш}} \rightarrow \frac{1}{I} = \frac{1}{R_V} + \frac{1}{R_2 + R_U}$
	$R_{общ} = 480 \text{ Ом}$		$\frac{U}{U_V} = \frac{R_V + R_{ш}}{R_V}, \rightarrow \frac{U}{U_V} = \frac{R_2 + R_U}{U_V} + 1 = \frac{R_2}{R_U} + 1$
			$\frac{U}{U_V} = \frac{1000}{200} + 1 = 6$



Ответ: 6

**§ 14. РАБОТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. ЗАКОН ДЖОУ-ЛЕНЦА. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОЩНОСТЬ**

**Закон Джоуля-Ленца для определения работы и мощности электрического тока:**

Когда электрический ток проходит через проводник, заряды перемещаются из точки с большим потенциалом в точку с меньшим потенциалом. Другими словами, электрическое поле внутри проводника перемещает свободные заряды из точки с большим потенциалом в точку с

меньшим потенциалом. Но в процессе этого переноса происходит расход энергии в результате неэластичных столкновений между свободными электронами и узлами кристаллической решетки, то есть электрическое поле выполняет работу по перемещению заряда по проводнику. Эта работа превращается в виде тепла и выделяет нагрев проводников.

Разность потенциалов на концах проводника – когда напряжение  $U$  равно электрическому полю,  $q$  выполняет работу, равную  $A = qU$ , перемещая электрический заряд из точки с большим потенциалом в точку с малым потенциалом (т. к. в процессе перемещения заряда  $U$  напряжение остается неизменным, а в процессе зарядки конденсатора вводит коэффициент  $1/2$ , так как значение напряжения линейно возрастает от 0 до  $U$ ). Если перемещенный заряд выразить через силу тока  $I$  и время прохождения заряда  $t$ , то работа, выполняемая электрическим током при перемещении заряда из точки с большим потенциалом в точку с меньшим потенциалом, будет:

$$A = qU = IUt \quad (14.1)$$

Приведенную выше формулу также можно выразить в других формах, используя закон Ома для участка цепи.

$$A = IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t \quad (14.2)$$

Согласно закону сохранения энергии, работа, выполняемая электрическим током, должна быть равна изменению энергии в окружающей среде. Другими словами, работа, выполняемая электрическим током, преобразуется в тепло, что означает, что работа, выполняемая током, равна количеству тепла, выделяемого в проводнике. Приведенную выше формулу также можно записать как:

$$Q = IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t \quad (14.3)$$

Приведенную выше формулу поскольку находят по отдельности, Дж. М. Джоуль и Э. Х. Ленц в их честь называют закон Джоуля-Ленца.

**Закон Джоуля-Ленца:** количество тепла, выделяемого в проводнике, равно количеству силы тока в проводнике, умноженному на сопротивление проводника и время прохождения тока.

Этот закон английский ученый Дж. Н. Джоуль (1818–1889) и русским физик Э. Х. Ленц (1804–1865) открыли в 1843 году в результате многочисленных экспериментов по изучению теплового действия тока, не зная друг друга.

Известный английский ученый Джеймс Прескотт Джоуль родился 24 декабря 1818 года в Сомерсворде, Англия. Будучи всемирно известным ученым, он внес большой вклад в становление термодинамики, обосновал закон сохранения энергии в своих экспериментальных работах, а также исследовал тепловое действие электрического тока и показал, что выделяемое в проводнике тепло пропорционально квадрату силы тока. В те времена количество тепла измерялось в калориях, а механическая работа и энергия — в ЕРГ, а тепло и энергия рассматривались как разные величины. Считается, что когда тепло нагревается, невидимая жидкость, известная как теплород, входит в тело, а когда оно охлаждается, выходит из него. Джоуль показал, что все эти три величины являются одним и тем же — количеством энергии и что они могут быть взаимозаменяемыми. За выдающиеся заслуги Джоуль был награжден королевской медалью 1852 года, медалью Копли 1866 года, медалью Ливерта 1880 года. Он умер 1889 октября 11 года в семье (ныне Манчестер), Англия, в возрасте 70 лет.



Джеймс Прескотт Джоуль (1818–1889)

Величина, характеризующая скорость, интенсивность превращения электрической энергии в каком-либо участке электрической цепи и энергию другого вида, называется мощностью электрического тока. В этом случае мощность электрического тока  $P$  называется работой  $A$ , выполненной в тот момент, когда ток проходит через  $I$ , или количеством тепла, выделяемого в проводнике в это время  $Q$ .

$$P = \frac{A}{t} = \frac{Q}{t}, \quad P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

(14.4)

Все электроприборы, используемые в быту, рассчитаны на напряжение 220 В в их паспорте будет прописано рекомендуемое для использования напряжение и генерируемая мощность. Это означает, что при подключении их к напряжению 220 В они будут работать от питания, записанного на их паспорте.

Например, то, что на лампы накаливания написано 220 В, 100 Вт, означает, что при подключении ее к напряжению 220 В она будет гореть с мощностью 100 Вт. В сельской местности, в отдаленных населенных пунктах в вечернее время напряжение значительно падает, так как все домохозяйства используют все электрические приборы. Предположим, что при падении напряжения до 200 В лампочка также не загорается при прежней мощности. Так как напряжение уменьшается в 1,1 раза, то мощность  $P = \frac{U^2}{R}$  по формуле уменьшается в 1,21 раза, то есть лампа накаливания загорается с мощностью, равной  $\frac{100}{1,21} \text{ Вт} \approx 82,64 \text{ Вт}$ .

Также стоит упомянуть, что так как все электроприборы, предназначенные для квартир, рассчитаны на одинаковое напряжение  $P = \frac{U^2}{R}$ , то по формуле мощность и сопротивление имеют обратную связь. Иными словами, сопротивление электрооборудования большой мощности будет малым и наоборот.

Например, электрическое сопротивление лампы накаливания мощностью 100 Вт будет равно  $R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{100} = 484 \text{ Ом}$ . Электрическое сопротивление лампы накаливания мощностью 200 Вт будет равно  $R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{200} = 242 \text{ Ом}$ .

Электрическое сопротивление современной лампы Аква мощностью 10 Вт будет равно  $R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{10} = 4840 \text{ Ом} = 4,84 \text{ КОм}$ .

Если несколько различных электрических сопротивлений соединены последовательно, давайте проверим, в каком соотношении находятся количества тепла, выделяющиеся в каждом из них за определенный промежуток времени. Так как при последовательном соединении сила тока во всех сопротивлениях по формуле равна  $Q = I^2 R \Delta t$ , то количество выделяемого в них тепла остается только в зависимости от их электрического сопротивления, т. е.  $Q \sim R$ . Таким образом, оказывается, что в том же соотношении, в котором находятся сопротивления, в таком же соотношении находятся и количества выделяемого в них тепла.

$$Q_1 : Q_2 : \dots : Q_n = R_1 : R_2 : R_3 : \dots : R_n$$

(14.5)

Приведенную выше формулу можно записать как для двух сопротивлений.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

(14.6)

Если несколько различных электрических сопротивлений соединены между собой параллельно, давайте проверим, в каком соотношении находятся количества тепла, выделяющиеся в каждом из них за определенный промежуток времени. Так как при параллельном соединении напряжение на всех сопротивлениях по формуле равно  $Q = \frac{U^2}{R} \Delta t$ , то и количества теплоты, выделяемые в них, остаются зависимыми только от их сопротивления, т. е.  $Q \sim \frac{1}{R}$ . Итак, в каком соотношении находятся сопротивления, так и количества выделяемого в них тепла находятся в обратном соотношении.

Приведенную выше формулу можно записать как для двух сопротивлений

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (14.7)$$

**Вопрос об определении времени выполнения работы системой сопротивлений:**

Во многих случаях в процессе решения задач несколькими сопротивлениям дается время для выполнения работы, и они просят время для выполнения этой работы вместе. Например, спиралью на нескольких электрических пинтах может быть задано время кипячения чая, а затем может быть задано время кипячения чая, когда эти спирали находятся вместе. Давайте посмотрим на этот вопрос.

Количества теплоты, выделяющиеся в них при подключении каждой спирали к источнику напряжения отдельно имеют вид.

$$Q_1 = \frac{U^2}{R_1} t_1, Q_2 = \frac{U^2}{R_2} t_2, Q_3 = \frac{U^2}{R_3} t_3, \dots, Q_n = \frac{U^2}{R_n} t_n$$

$$R_1 = \frac{U^2}{Q_1} t_1, R_2 = \frac{U^2}{Q_2} t_2, R_3 = \frac{U^2}{Q_3} t_3, \dots, R_n = \frac{U^2}{Q_n} t_n$$

Из этого определим сопротивления

(рисунок 14.1-а и рисунок 14.2-а). При соединении всех спиралей последовательно или параллельно снова с одним и тем же источником напряжения  $U$  будут выделяться количества теплоты

$$Q = \frac{U^2}{R_{\text{экв}}} t$$

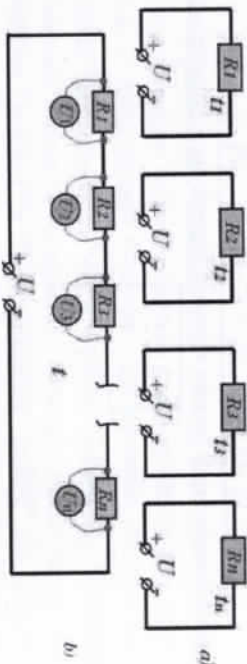


Рисунок 14.1

Поскольку во всех случаях тепловые ресурсы расходуется именно на кипение воды, то эти тепловые количества равны между собой:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_n = Q_{\text{общ}} = c m \Delta t$$

Зная их, рассмотрим отдельно заданное время для последовательных и параллельных случаев и определим.

$$Q_1 : Q_2 : Q_3 : \dots : Q_n = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3} : \dots : \frac{1}{R_n} \quad (14.8)$$

Или их, рассмотрим отдельно заданное время для последовательных и параллельных случаев и определим.

Во-первых, давайте посмотрим на случай последовательного соединения (рис. 14.1). Выразим общее сопротивление через сопротивления, находим общую величину. После расчетов получаем результат.

$$Q = \frac{U^2}{R_{\text{экв}}} t = \frac{U^2}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} t = \frac{U^2}{\frac{Q_1}{t_1} + \frac{Q_2}{t_2} + \dots + \frac{Q_n}{t_n}} t = \frac{Q U^2}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} t$$

Теперь давайте посмотрим случай параллельный соединений (рис. 14.2).

Выразим общее сопротивление через сопротивления, находим общую величину. После расчетов получаем результат.

$$Q = \frac{U^2}{R_{\text{экв}}} t = \left( \frac{U^2}{R_1} + \frac{U^2}{R_2} + \dots + \frac{U^2}{R_n} \right) t = \left( \frac{Q_1}{t_1} + \frac{Q_2}{t_2} + \dots + \frac{Q_n}{t_n} \right) t = \left( \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \dots + \frac{1}{t_n} \right) Q t \rightarrow \frac{1}{t} = \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \dots + \frac{1}{t_n}$$

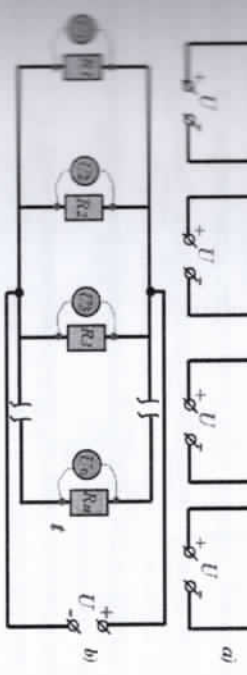


Рисунок 14.2

Теперь мы суммируем полученные результаты и записываем их в виде формулы.

Если первую спираль заваривать в момент  $t_1$ , вторую спираль в момент  $t_2$  и т.д. до  $n$ -спирали в момент  $t_n$ , когда они соединены последовательно, вместе, двинется этот же чай в момент (рис. 14.1).

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n \quad (14.9)$$

Если первую спираль заваривать в момент  $t_1$ , вторую спираль в момент  $t_2$  и т.д. до  $n$ -спирали при соединении параллельно вместе будет кипеть этот же чай в момент  $t$  (рис. 14.2).

$$\frac{1}{t} = \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \dots + \frac{1}{t_n} \quad (14.10)$$



Находим напряжение на  $k$ -потребителе.

$$P'_k = I_k^2 R_k = I_{\text{общ}}^2 R_k = \left( \frac{P_{\text{общ}}}{U} \right)^2 \frac{U^2}{R_k} = \frac{P_{\text{общ}}^2}{R_k}$$

$$U'_k = I'_k R_k = I R_k = \frac{P_{\text{общ}}}{U} \frac{U^2}{R_k} = \frac{P_{\text{общ}}}{R_k} \cdot U$$

Находим суммарную силу тока.

$$I_{\text{общ}} = I_1 = I_2 = \dots = I_n = \frac{P_{\text{общ}}}{U}$$

Таким образом, при последовательном подключении потребителей  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ , генерирующих мощности при подключении к одному и тому же напряжению  $U$ , общая мощность в сети  $P_{\text{общ}}$ , произвольная мощность  $k$ -потребителя  $P'_k$ , произвольная напряжение  $k$ -потребителе  $U'_k$ , общая сила тока в сети  $I_{\text{общ}}$  будут следующими:

$$\frac{1}{P_{\text{общ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}, \quad P'_k = \frac{P_{\text{общ}}^2}{R_k}$$

$$U'_k = \frac{P_{\text{общ}}}{R_k} \cdot U, \quad I_{\text{общ}} = I_1 = I_2 = \dots = I_n = \frac{P_{\text{общ}}}{U}$$

Следует отметить, что результирующая мощность, которая образуется при последовательном подключении потребителей, получается даже меньше, чем наименьшая из мощностей, записанных в паспорте каждого потребителя. Из приведенной выше формулы видно, что после последовательного подключения мощностей получается, что потребитель большой мощности будет работать с меньшей мощностью, и наоборот.

$$P'_1 : P'_2 : P'_3 : \dots : P'_n = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3} : \dots : \frac{1}{R_n} \quad (14.14)$$

Точно так же напряжения на потребителях будут маленькими на потребителе, который изначально был большим, и наоборот.

$$U'_1 : U'_2 : U'_3 : \dots : U'_n = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3} : \dots : \frac{1}{R_n} \quad (14.15)$$

*b.2) потребляемая мощность два.*

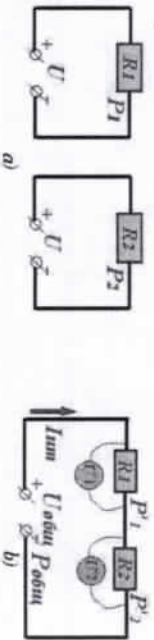


Рисунок 4.6

Это можно назвать частным случаем приведенных выше формул в числом потребителей два. Общая мощность при этом имеет вид:

$$\frac{1}{P_{\text{общ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}, \quad \rightarrow \quad P_{\text{общ}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Мощность в каждом из потребителей будет:

$$P'_1 = \frac{P_{\text{общ}}^2}{R_1} = \frac{1}{R_1} \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 R_1 \quad \text{ва} \quad P'_2 = \frac{P_{\text{общ}}^2}{R_2} = \frac{1}{R_2} \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)^2 R_2$$

Напряжение на каждом из потребителей имеет вид:

$$U'_1 = \frac{P_{\text{общ}}}{R_1} U = \frac{1}{R_1} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} U = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \quad \text{ва} \quad U'_2 = \frac{P_{\text{общ}}}{R_2} U = \frac{1}{R_2} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} U = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U$$

Таким образом, при последовательном подключении потребителей, генерирующих мощности  $R_1$  и  $R_2$  при подключении к одному и тому же напряжению  $U$ , общая мощность в сети  $P_{\text{общ}}$ , мощность на каждом потребителе  $P'_1$  и  $P'_2$ , напряжение на каждом потребителе  $U'_1$  и  $U'_2$ , сила тока в сети  $I_{\text{общ}}$  будут следующими:

$$P_{\text{общ}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}, \quad P'_1 = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \cdot R_1, \quad P'_2 = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)^2 \cdot R_2,$$

$$U'_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U, \quad U'_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U, \quad I_{\text{общ}} = I_1 = I_2 = \frac{P_{\text{общ}}}{U}$$

Из приведенной выше формулы видно, что после последовательного подключения мощностей получается, что потребитель большой мощности работает с меньшей мощностью, и наоборот.

$$\frac{P'_1}{P'_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (14.17)$$

Точно так же напряжения на потребителях будут маленькими на потребителе, который сначала был большим, и наоборот.

$$\frac{U'_1}{U'_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (14.18)$$

**III) При параллельном подключении потребителей.**  
 а) Известно сопротивление потребителей.

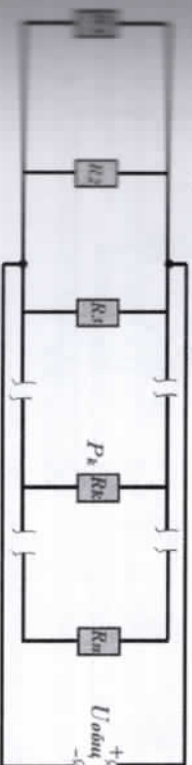


Рисунок 14.7

Поскольку напряжения на всех сопротивлениях равны при параллельном соединении сопротивлений, то произвольная мощность на  $k$ -сопротивлении будет:

$$P_k = \frac{U_k^2}{R_k}$$

А полная мощность равна сумме мощностей при всех сопротивлениях.

$$P_{\text{общ}} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n = \frac{U^2}{R_1} + \frac{U^2}{R_2} + \frac{U^2}{R_3} + \dots + \frac{U^2}{R_n} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \right) U^2$$

Таким образом, произвольное  $k$ -сопротивление и резистором, подключенных параллельно к источнику постоянного напряжения  $U$ , является  $P_k$  и общая мощность  $P_{\text{общ}}$  будет равна:

$$P_k = \frac{U^2}{R_k}, \quad P_{\text{общ}} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \right) U^2 \quad (14.19)$$

**а.2) потребляемые сопротивления два.**

Используя формулу, найденную ранее, мы можем легко вывести мощность в каждом из потребителей и общую мощность (рис. 14.8).

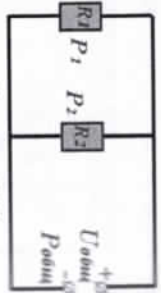


Рисунок 14.8

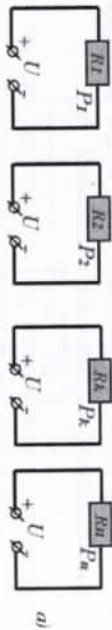
Следовательно, если сопротивлений два, мощность на каждом из них равна  $P_1$  и  $P_2$ , а общая мощность  $P_{\text{общ}}$  равна:

$$P_1 = \frac{U^2}{R_1}, \quad P_2 = \frac{U^2}{R_2}, \quad P_{\text{общ}} = P_1 + P_2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2} \cdot U^2 \quad (14.20)$$

**б.) известны мощности потребителей.**

При параллельном соединении сопротивлений напряжения на всех сопротивлениях равны (рис. 14.9):

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_k = \dots = U_n$$



а)

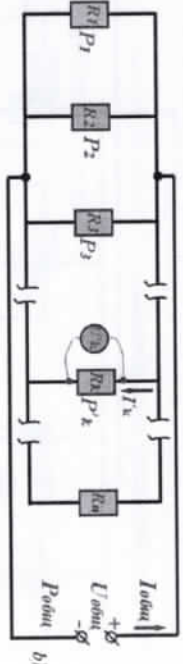


Рисунок 14.9

А сила тока-разветвленная имеет вид:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_k + \dots + I_n$$

Общая мощность

$$P_{\text{общ}} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right) U^2 = \frac{U^2}{R_1} + \frac{U^2}{R_2} + \dots + \frac{U^2}{R_n} = P_1 + P_2 + \dots + P_k + \dots + P_n$$

Мощность произвольная  $k$ -потребителя будет следующей.

$$P_k = \frac{U_k}{R_k} = \frac{U}{R_k}$$

Сила тока произвольная  $k$ -потребителя будет следующей.

$$I_k = \frac{P_k}{U_k} = \frac{P_k}{U} = I_k$$

А суммарная мощность тока записывается в виде через мощность.

$$I_{\text{общ}} = \frac{P_{\text{общ}}}{U}$$

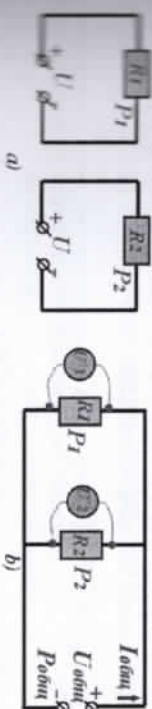
Следовательно, при подключении одного и того же  $U$  к напряжению  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$  при параллельном подключении потребителей, генерирующих мощность, к напряжению  $U$  получается, что суммарная мощность  $P_{\text{общ}}$  в сети произвольная  $k$ -мощность на потребителе  $P_k$ , произвольная  $k$ -напряжение на потребителе  $U_k$ , произвольная  $k$ -сила тока на потребителе  $I_k$ , суммарная сила тока  $I_{\text{общ}}$  в сети будет равна (рис. 14.10):

$$P_{\text{общ}} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n, \quad P_k = P_k$$

$$U_k = U, \quad I_k = \frac{P_k}{U}, \quad I_{\text{общ}} = \frac{P_{\text{общ}}}{U} \quad (14.21)$$

**б.2) потребляемая мощность два.**

Для сопротивления, подключенных параллельно, являются частным случаем сопротивления два, подключенного параллельно. Используя предыдущую формулу как  $p=2$ , мы получаем следующие формулы.



а)

Рисунок 14.10

При подключении того же  $U$  к напряжению  $P_1$  и  $P_2$  параллельно подключаем потребителей, которые генерируют мощности при подключении того же  $U$  к напряжению общая мощность в сети  $P_{\text{общ}}$ , мощность на каждом потребителе  $P_1$  и  $P_2$ , напряжение на каждом потребителе  $U_1$  и  $U_2$ , сила тока  $I_1$  и  $I_2$ , проходящего через каждого потребителя и сила тока в сети  $I_{\text{общ}}$  будет следующей:

$$P_{\text{общ}} = P_1 + P_2, \quad \begin{cases} P_1 = P_1 \\ P_2 = P_2 \end{cases}, \quad \begin{cases} U_1 = U_1 \\ U_2 = U_2 \end{cases}, \quad \begin{cases} I_1 = \frac{P_1}{U} \\ I_2 = \frac{P_2}{U} \end{cases}, \quad I_{\text{общ}} = \frac{P_{\text{общ}}}{U}$$

Все формулы, которые мы привели выше для мощности, являются частными формулами, и их хорошо усвоение служит для облегчения решения задач.

Вопросы по теме:

1. Опишите закон Джоуль-Ленца и запишите его формулу.
2. Какие формулы для мощности можно вывести из формулы Джоуль-Ленца?
3. Как определяется время кипения воды при последовательном и параллельном соединении спиралей?
4. Какой будет результирующая мощность при последовательном подключении потребителей, мощность которых известна? Запишите ответ для двух потребителей.
5. С какой мощностью работает каждый из них при последовательном подключении потребителей, мощность которых известна? Запишите ответ для двух потребителей.
6. Какой будет результирующая мощность при параллельном соединении потребителей, мощность которых известна? Запишите ответ для двух потребителей.
7. С какой мощностью работает каждый из них при параллельном соединении между собой потребителей, мощность которых известна? Запишите ответ для двух потребителей.

Решение задачи:

1. Резисторы с сопротивлением 150 Ω и 90 Ω подключаются к розетке последовательно. Сколько кДж тепла выделяется на первом резисторе, когда на втором резисторе выделяется 18 кДж тепла?

- A) 10 В) 20 C) 30 D) 90 E) 150

Дано:

$R_1 = 150 \text{ Ом}$   
 $R_2 = 90 \text{ Ом}$   
 $Q_2 = 18000 \text{ Дж}$

Решение:

Количество теплоты, выделяющееся из цепи по закону Джоуль-Ленца  
 $Q_1 = I^2 R_1 t$  и  $Q_2 = I^2 R_2 t$   
 Принимая во внимание, что сила тока в каждой проводнике одинакова, и обобщая выражения  
 $Q_1 = \frac{Q_2 R_1}{R_2} = 30 \text{ кДж}$

Ответ: C)

2. Сколько электронное протекает через этот участок цепи, когда на участке с напряжением 200 В ток выполняет работу 16 кДж?

Дано:

$A = 16000 \text{ Дж}$   
 $U = 200 \text{ В}$   
 $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

Решение:

Из выражения работы, выполняемой электрическим током  
 $A = UIt$

n = ?

Принимая во внимание, что выражение силы тока

$$I = \frac{q}{t} = \frac{en}{t}$$

$$A = \frac{en}{t} U t = enU$$

Из этого следует, что  $n = \frac{A}{eU} = 5 \cdot 10^{20}$  получается результомат

Ответ:  $5 \cdot 10^{20}$

3. Если нагреватель с электрическим сопротивлением R кипит воду в спиральном сосуде за 8 мин, то за какое время нагреватель, спирали которого соединены, как на рисунке, будет кипятить ту же воду? Укажите, что вся электрическая энергия расходуется на нагрев воды.

Дано:

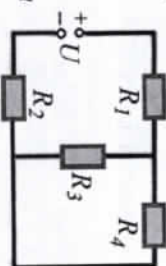
$R_1 = R_2 = R$   
 $R_3 = R_4 = 2R$   
 $t_1 = 8 \text{ мин}$

Решение:

$R_3$  и  $R_4$  резисторы соединены параллельно.

$$R_{34} = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = \frac{2R \cdot 2R}{2R + 2R} = R$$

$t_1 = ?$



$R_1, R_{34}$ , и  $R_2$  резисторы подключаются последовательно.

$$R_{\text{sum}} = R_1 + R_2 + R_{34} = R + R + R = 3R$$

Тогда, где была начальная мощность  $P_1 = \frac{U^2}{R}$ , будет следующая

мощность  $P_2 = \frac{U^2}{3R}$ . Отсюда следует вывод, что мощность уменьшится в 3 раза, от этого время кипения увеличивается в 3 раза.

$$Q = P_1 t_1 = P_2 t_2, \rightarrow t_2 = \frac{P_1}{P_2} t_1 = 3t_1 = 24 \text{ мин}$$

Ответ: 24 мин

§ 15. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ. ЗАКОН ДЖОУЛЬ-ЛЕНЦА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ

Изучники постоянного тока:

Чтобы генерировать электрический ток в проводниках, необходимо создать электрическое поле внутри этого проводника. С этой задачей справляются источники тока.

Источники тока разнообразны, и все они выполняют работу по разведению положительных и отрицательных зарядов в двух местах. Непротивоположные заряды накапливаются на полюсах источника. Полнос-это

место соединения источника с клеммами потребителей. Все источники тока имеют два полюса, и в одном из этих полюсов накапливаются положительные заряды, а в другом - отрицательные заряды. Между этими полюсами существует внутреннее электрическое поле, а когда полюса соединяются друг с другом через проводник, возникает внешнее электрическое поле. Электрический ток возникает в результате того, что электрическое поле, создаваемое внутри проводника, перемещает свободные электроны вдоль проводника.

В источниках тока в процессе разделения зарядов на полюсы механическая, химическая, световая, внутренняя и другие виды энергии преобразуются в электрическую. Следовательно, поскольку электричество является одним из видов энергии.

Например, в электрофорной машине механическая энергия преобразуется в внутреннюю энергию, в термоэлементе - в световую энергию, а в аккумуляторных и гальванических элементах химическая энергия преобразуется в электрическую энергию.

Во всех гальванических элементах электроды нераасходованы в растворе. Поэтому через определенное время электроды заменяют.

А в аккумуляторах электроды не изнашиваются. Чаще всего используются аккумуляторы из двух свинцовых пластин (электродов), погруженных в раствор серной кислоты. Чтобы аккумулятор был источником тока, это необходимо предварительно зарядить. Для этого необходимо зарядить аккумулятор, подключив его к другой розетке. При зарядке необходимо будет подключить (+) и (-) полюсы аккумулятора к тем же знаковым полюсам источника тока. В процессе зарядки электрический ток увеличивает химическую энергию аккумулятора, выполняя работу. В процессе разряда аккумулятор подключается к потребителю, при этом химическая энергия преобразуется в электрическую.

**ЭДС источников:**

Пусть два шара заряжены одинаковым количеством разных знаковых зарядов. Под действием кулоновских сил при их соприкосновении эти сферы быстро нейтрализуются. Лишние электроны в отрицательно заряженной сфере движутся по кулоновским силам и в направлении, противоположном силовым линиям электрического поля, к положительно заряженной сфере (рис.15.1-а). Электроны, достигшие положительно заряженной сферы, нейтрализуются, заполняя недостающие электроны. Электрический ток возникает в проводах на короткое время, когда сферы с положительным и отрицательным зарядом соединяются проводом. При нейтрализации пружинков прохождение тока также прекращается. Чтобы всегда протекли

ток, в сферах всегда должны присутствовать положительные и отрицательные заряды. Для этого необходимо выполнить работу, при которой внешняя сила отталкивает электроны от (+) полюса и перемещает их в направлении, противоположном направлению кулоновских сил, а электрическое поле в направлении (-) полюса (рис.15.1-б). Только тогда будут потенциалы между (+) и (-) полюсами, и в замкнутой системе ток будет нейтральным.

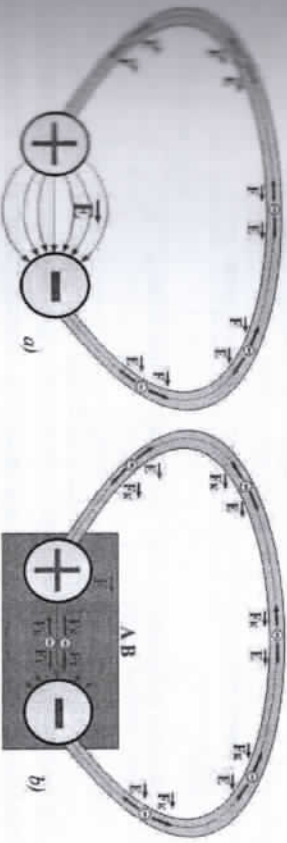


Рисунок 15.1

Все силы, кроме кулоновские силы, могут быть внешней силой. Например, в гальванических элементах химические силы выполняют работу против кулоновских сил. Действие внешних сил на заряды называется электродвижущей силой (ЭДС).

ЭДС в закрытом контуре в количественном отношении равен работе внешних сил при перемещении единичного положительного заряда по замкнутому контуру.

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{внеш}}}{q} \quad (15.1)$$

При разомкнутой цепи ЭДС источника равен произведению потенциалов на его полюсах. Следовательно, ЭДС измеряется в вольтах, как и напряжение.

**Источники для полной цепи. Определение ЭДС и внутреннего сопротивления:**

Давайте сформируем замкнутую цепь, подключив резистор  $R$  к розетке (рис.15.2). Пусть ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутреннее сопротивление источника тока  $r$ . В генераторах внутреннее сопротивление  $r$  означает сопротивление вольтов в катушках, а в гальванических элементах - раствора электролита и электродов под противоположным понимается. Поскольку в замкнутой цепи нет разветвления,



Рисунок 15.2



в замкнутой цепи будет существовать только один ток  $I$ , проходящий через внешнее сопротивление  $R$  и внутреннее сопротивление  $R$ .

Применяя закон Ома к замкнутой цепи, сила тока в замкнутой цепи связывается  $I$  с ЭДС  $\varepsilon$  и полным сопротивлением  $(R+r)$  замкнутой цепи. В этом случае сумма падений напряжения на внешней и внутренней частях цепи дает ЭДС источника.

$$\varepsilon = U_n + U_r = IR + Ir \quad (15.2)$$

Из приведенной выше формулы мы можем записать падения напряжения как на внешней, так и на внутренней части полной цепи.

$$U_n = IR, \quad U_r = Ir \quad (15.3)$$

Мы можем определить силу тока в замкнутой цепи.

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r} \quad (15.4)$$

Приведенная выше формула является математическим выражением закона Ома для замкнутой цепи и может быть описана следующим образом:

*Сила тока, проходящего через замкнутую цепь, прямо пропорциональна ЭДС источника и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи.*

Если клеммы розетки соединить проводом, то произойдет короткое замыкание. Сила тока, создаваемая при коротком замыкании, имеет наибольшее значение, и при подключении источника к потребителю в цепи всегда образуется ток меньше, чем ток короткого замыкания.

Сила тока в коротком замыкании будет равна:

$$I_0 = \frac{\varepsilon}{r}, \quad I < I_0 \quad (15.5)$$

Точное значение внутреннего сопротивления и ЭДС источника тока не может быть найдено с помощью каких-либо измерений. Найти их можно будет по расчету, только если в нашем распоряжении будут два разных сопротивления, вольтметр и амперметр (рис.15.3). Здесь мы не учитываем сопротивление амперметра, поскольку оно также незначительно мало, чем внутреннее сопротивление источника. При подключении сопротивления  $R_1$  к источнику возникает сила тока  $I_1 = \frac{\varepsilon}{R_1+r}$ , а при подключении сопротивления

$R_2$ -сила тока  $I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2+r}$ . По соотношению этих величин можно найти

внутреннее сопротивление источника.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2+r}{R_1+r}, \rightarrow I_1 R_1 + I_1 r = I_2 R_2 + I_2 r, \rightarrow r = \frac{I_1 R_1 - I_2 R_2}{I_2 - I_1}$$

Значение источника  $\varepsilon$  можно определить из формулы ЭДС  $\varepsilon = I_1(R_1+r)$  или  $\varepsilon = I_2(R_2+r)$  из произвольной. В результате имеем следующие выражения:

$$\varepsilon = I_1(R_1+r) = I_1 \left( R_1 + \frac{I_1 R_1 - I_2 R_2}{I_2 - I_1} \right) = I_1 \frac{I_2 R_1 - I_1 R_2}{I_2 - I_1} = \frac{R_1 - R_2}{I_2 - I_1} I_1 I_2$$

Следовательно, если при подключении сопротивления  $R_1$  к источнику возникает сила тока  $I_1$ , а при подключении сопротивления  $R_2$  возникает сила тока  $I_2$ , то ЭДС и внутреннее сопротивление источника будут следующими (рис. 15.3):

$$\varepsilon = \frac{R_1 - R_2}{I_2 - I_1} I_1 I_2, \quad r = \frac{I_1 R_1 - I_2 R_2}{I_2 - I_1} \quad (15.6)$$

Даже имея в своем распоряжении амперметр и вольтметр, мы можем определить  $\varepsilon$  ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока. При этом мы не учитываем сопротивление амперметра, поскольку оно также незначительно мало, чем внутреннее сопротивление источника. Поскольку внутреннее сопротивление вольтметра бесконечно больше сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ , к которым он подключен, то ток, проходящий через вольтметр, мы игнорируем ток, протекающий через вольтметр (рис.15.4). ЭДС и внутреннее сопротивление источника можно вывести из приведенной формулы. При этом мы получаем результаты как для ЭДС, так и для внутреннего сопротивления

$$\varepsilon = \frac{R_1 - R_2}{I_2 - I_1} I_1 I_2 = \frac{R_1 I_1 I_2 - R_2 I_1 I_2}{I_2 - I_1} = \frac{U_1 I_2 - U_2 I_1}{I_2 - I_1}$$

$$r = \frac{I_1 R_1 - I_2 R_2}{I_2 - I_1} = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1}$$

А неизвестные сопротивления, подключаемые к источнику, можно определить по соотношению показаний вольтметров и амперметров:

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} \quad \text{и} \quad R_2 = \frac{U_2}{I_2}$$

Следовательно, если при подключении одного сопротивления к источнику в цепи возникает сила тока  $I_1$  и происходит падение напряжения в проводнике  $U_1$ , а при подключении другого сопротивления в цепи возникает сила тока  $I_2$  и происходит падение напряжения в проводнике  $U_2$ , ЭДС,

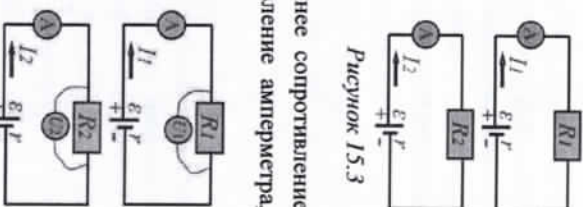


Рисунок 15.3

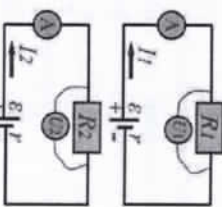


Рисунок 15.4

внутреннее сопротивление источника и подключенные сопротивления будут следующими: (рис. 15.4):

$$\varepsilon = \frac{U_1 I_2 - U_2 I_1}{I_2 - I_1}, \quad r = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1}, \quad R_1 = \frac{U_1}{I_1}, \quad R_2 = \frac{U_2}{I_2} \quad (15.7)$$

**Закон Джоуль-Ленца для полной цепи. КПД источника:**

Обычно при подключении источников тока к внешнему потребителю нагревается как потребитель, так и сам источник тока. Следовательно, можно сказать, что электрическая энергия преобразуется в тепло как внутри источника тока, так и у потребителя, подключенного к нему. Согласно закону сохранения энергии, работа внешних сил при перемещении заряда по замкнутому контуру равна количеству теплоты, выделяемой в полной цепи.

$$A_{\text{источ}} = Q_{\text{отд}} \quad (15.8)$$

Теперь давайте определим работу, выполняемую внешними силами. Поскольку ЭДС-это работа, выполняемая внешними силами, и для полной цепи мы используем закон Ома.

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{источ}}}{q}, \rightarrow A_{\text{источ}} = \varepsilon q = \varepsilon I \Delta t, \rightarrow A_{\text{источ}} = \varepsilon I \Delta t = I(R+r) I \Delta t = I^2 (R+r) \Delta t, \rightarrow$$

$$A_{\text{источ}} = \varepsilon I \Delta t = \varepsilon \frac{\varepsilon}{R+r} \Delta t = \frac{\varepsilon^2}{R+r} \Delta t$$

Следовательно, работа, выполняемая в полной цепи, будет выглядеть следующим образом:

$$A_{\text{источ}} = I^2 (R+r) \Delta t = \frac{\varepsilon^2}{R+r} \Delta t = I \varepsilon \Delta t \quad (15.9)$$

Формула, найденная выше, является математическим выражением закона Джоуль-Ленца для полной цепи. Если мы запишем закон Джоуль-Ленца для мощности, мы получим:

$$P_{\text{отд}} = I^2 (R+r) = \frac{\varepsilon^2}{R+r} = I \varepsilon \quad (15.10)$$

Количество теплоты, выделяемого в полной цепи, равно сумме количества тепла  $Q_r$ , выделенного внутри источника, и количества тепла  $Q_R$ , выделенного вне источника.

$$Q_{\text{отд}} = Q_r + Q_R \quad (15.11)$$

Теперь запишем из них количества тепла, выделенного внутри источника, и тепла, выделенного вне источника.

$$Q_{\text{отд}} = A_{\text{источ}} = \varepsilon I \Delta t = I(R+r) I \Delta t = I^2 (R+r) \Delta t = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t = Q_R + Q_r$$

Количество тепла, выделяемого внутри и снаружи источника имеет выражение:

$$Q_r = I^2 r \Delta t, \quad Q_R = I^2 R \Delta t \quad (15.12)$$

Из полной цепи раздельная мощность равна сумме  $P_r$ -мощности, разделенной внутри источника, и  $P_R$ -мощности, разделенной вне источника.

$$P_{\text{отд}} = P_r + P_R \quad (15.13)$$

При этом мощности выделенные внутри и снаружи источника имеет вид:

$$P_r = I^2 r, \quad P_R = I^2 R \quad (15.14)$$

Цель состоит в том, чтобы использовать источник тока, а электрическую энергию, генерируемую источником, подключить к потребителю. Например, мы можем использовать, подключив аккумуляторную батарею к лампе, или мы можем использовать его тепло, подключив его к электропиле. Что бы это ни было, мы используем энергию, которая выходит за пределы источника, в то время как энергия, которая выделяется внутри источника, не может быть использована. Поэтому энергия, выделяемая вне источника, - это работа, которая была задумана, спланирована, направлена на то, что мы называем полезной работой. А энергия, выделяющаяся в источнике-это работа, которая не была запланирована, не предвидена, отклонена от цели, которую мы называем расточительной работой. Потому что наш план состоит не в том, чтобы нагреть сам аккумулятор, а в том, чтобы вытолкнуть эту энергию и доставить ее потребителю.

*Внимание, которая указывает, какая часть общей энергии, выделяемой в источнике тока, направляется к цепи, называется КПД источника тока.*

Давайте определим значение КПД источника постоянного тока.

$$\eta = \frac{Q_{\text{полез}}}{Q_{\text{отд}}} \cdot 100\% = \frac{Q_R}{Q_r + Q_R} \cdot 100\% = \frac{I^2 R \Delta t}{I^2 (R+r) \Delta t} \cdot 100\% = \frac{R}{R+r} \cdot 100\%;$$

$$\eta = \frac{Q_{\text{полез}}}{Q_{\text{отд}}} \cdot 100\% = \frac{Q_R}{Q_{\text{отд}}} \cdot 100\% = \frac{I U_R \Delta t}{I \varepsilon \Delta t} \cdot 100\% = \frac{U_R}{\varepsilon} \cdot 100\%$$

Следовательно, КПД источника постоянного тока будет следующим.

$$\eta = \frac{Q_R}{Q_{\text{отд}}} \cdot 100\% = \frac{U_R}{\varepsilon} \cdot 100\% = \frac{R}{R+r} \cdot 100\% \quad (15.15)$$

Из приведенной выше формулы также видно, что по мере увеличения внутреннего сопротивления увеличивается и КПД. При подключении к бесконечно большому сопротивлению значение КПД будет примерно 99.999%. Например, при подключении источника тока к вольтметру вольтметр показывает приблизительно  $U_R \approx \varepsilon$ , так как сопротивление вольтметра бесконечно больше внутреннего сопротивления источника.

Какая-то часть суммарной мощности, генерируемой при подключении внешнего резистора к источнику постоянного тока, нагревает сам источник, какая-то другая часть выходит наружу. Даже при подключении любого внешнего сопротивления к источнику питания значение выходной мощности остается неизменным. Эта выходная мощность является полезной мощностью, и именно эту полезную мощность нам нужно будет максимально увеличить. Определим внешнее сопротивление, при котором выходная мощность будет максимальной, и значение этой максимальной мощности.

Воспользуемся формулой для мощности, выделенной вне источника.

$$P_R = I^2 R = \frac{\varepsilon^2}{(R+r)^2} \varepsilon^2$$

Здесь  $\varepsilon$  и  $r$  величины-неизменяемые числа. Следовательно, внешняя сила является функцией переменной, которая связана только с  $R$ . Мы хорошо знаем из математики, что функция достигает своих наибольших или наименьших значений, когда ее производная от переменной равна нулю. Следовательно, оказывается, что можно достичь цели, установив производную от внешней мощности на внешнее сопротивление, равное нулю.

$$P'_R = \frac{d}{dR} \left( \frac{\varepsilon^2}{(R+r)^2} \varepsilon^2 \right) = \varepsilon^2 \frac{1 \cdot (R+r)^{-2} \cdot (-2)(R+r) \cdot R}{(R+r)^4} = \varepsilon^2 \frac{R+r-2R}{(R+r)^3} = \varepsilon^2 \frac{r-R}{(R+r)^3} = 0, \rightarrow R=r$$

Следовательно, при  $R=r$  будет иметь наибольшую внешнюю мощность. Значение внешней мощности в этом равно:

$$P_R(r) = \frac{\varepsilon^2}{(r+r)^2} \varepsilon^2 = \frac{\varepsilon^2}{4r}$$

Таким образом, значение внешнего сопротивления, при котором наибольшая мощность выделяется во внешней цепи, и при котором внешняя мощность будет равна:

$$\boxed{\text{При } R=r, \text{ то } P_R = \frac{\varepsilon^2}{4r} \text{ будет}} \quad (15.16)$$

Внешняя мощность при подключении сопротивления  $R_1$  к источнику

$$P_{R1} = \frac{\varepsilon^2}{(R_1+r)^2} \varepsilon^2$$

в то время как внешняя мощность при подключении резистора  $R_2$  равно:

$$P_{R2} = \frac{\varepsilon^2}{(R_2+r)^2} \varepsilon^2$$

Из приведенной выше формулы возникает вопрос. Поскольку при  $R=r$  мощность во внешней цепи достигает своего максимального значения

$R_2 = \frac{\varepsilon^2}{4r}$ , то какова мощность при  $R < r$  или при  $R > r$ ? При этом значения мощности будут меньше, чем  $\frac{\varepsilon^2}{4r}$ . Каждому значению мощности  $P_R < \frac{\varepsilon^2}{4r}$

соответствуют два значения сопротивления  $R < r$  и  $R > r$ . Если известно, что при определенных значениях сопротивлений  $R_1 < r$  и  $R_2 > r$  во внешней цепи выделяется одинаковые мощности, то можно определить внутреннее сопротивление источника  $r$ .

Учитывая, что  $P_{R1} = P_{R2}$  условно, получаем искомый величину.

$$\frac{R_1}{(R_1+r)^2} \varepsilon^2 = \frac{R_2}{(R_2+r)^2} \varepsilon^2, \rightarrow \frac{R_2+r}{R_1+r} = \frac{\sqrt{R_2}}{\sqrt{R_1}}, \rightarrow R_2 \sqrt{R_1+r} \sqrt{R_1} = R_1 \sqrt{R_2+r} \sqrt{R_2}, \rightarrow r(\sqrt{R_2}-\sqrt{R_1}) = R_2 \sqrt{R_1}-R_1 \sqrt{R_2}, \rightarrow r(\sqrt{R_2}-\sqrt{R_1}) = \sqrt{R_1 R_2} (\sqrt{R_2}-\sqrt{R_1}), \rightarrow r = \sqrt{R_1 R_2}$$

во внешней цепи значения, равные.

$$\frac{16r^2}{9r^2} = \frac{36r^2}{25r^2}, \dots, \frac{nc^2}{(n+1)^2 r^2} \quad \text{так как значения выделяется на одинаковые}$$

мощности.

Таким образом, если при подключении сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  к источнику тока мощность в этих сопротивлениях одинаковы, внутреннее сопротивление источника будет:

$$\boxed{r = \sqrt{R_1 R_2}} \quad (15.17)$$

Из приведенной выше формулы видно, что внутреннее сопротивление источника тока будет равно среднему арифметическому сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ . Например, внешних сопротивлений

$$\begin{cases} R_1 = r/2 \\ R_2 = 2r \end{cases}, \begin{cases} R_1 = r/3 \\ R_2 = 3r \end{cases}, \begin{cases} R_1 = r/4 \\ R_2 = 4r \end{cases}, \dots, \begin{cases} R_1 = r/n \\ R_2 = nr \end{cases}$$

во внешней цепи значения, равные значениям, равным  $\frac{16r^2}{9r^2}, \frac{36r^2}{25r^2}, \dots, \frac{nc^2}{(n+1)^2 r^2}$ .

Напомним электрических величин от внешнего сопротивления:

Теперь давайте проверим, как изменяются такие величины, как сила тока, напряжение, мощность при подключении данного источника тока к переменному внешнему сопротивлению.

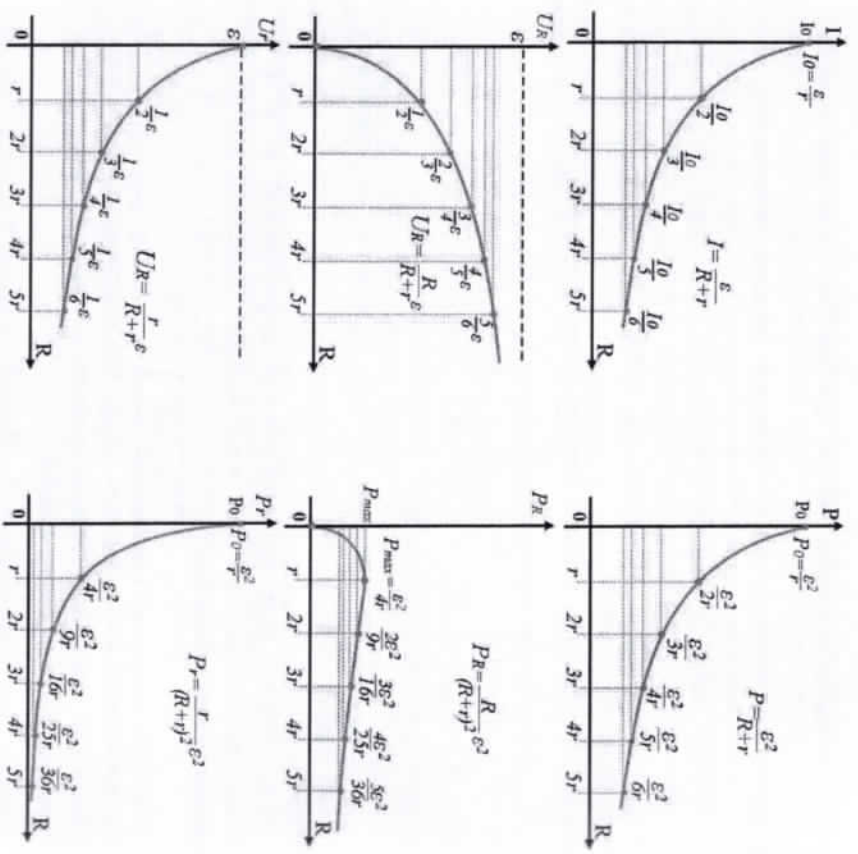


Рисунок 15.5

Нам дан источник постоянного тока с внутренним сопротивлением  $\epsilon$  и внутренним сопротивлением  $r$ . Чтобы подключить его к этому источнику, пусть в нашем распоряжении будут сопротивления  $R = r, 2r, 3r, 4r, 5r, \dots, nr$ . Вычисляем значения упрощенных величин, поочередно подключая эти сопротивления к источнику тока. В результате расчета получаем графики на рис. 15.5. Формулы, выражающие величины, также изображены на рисунках.

Вопросы по теме:

1. Что называется ЭДС?
2. Единица измерения ЭДС, помпачага и напряжения одинаковы.
3. Напишите математическое выражение закона Ома для полной цепи? Чем это отличается от закона Ома для участка цепи?
4. Какие существуют способы определения ЭДС и внутреннего сопротивления источника, внутреннее сопротивление и ЭДС которого

- неизвестны?
5. Запишите выражения падения напряжения внутри и снаружи источника.
  6. Что такое короткое замыкание? Запишите ток короткого замыкания.
  7. Запишите выражения потребляемой мощности внутри и снаружи источника.
  8. При выполнении какого условия мощность во внешней цепи будет максимальной?
  9. Что называется КПД источника тока? Запишите формулу КПД. Когда КПД становится максимальным?

Решение задачи:

1. При скорости лампочки от элемента с нагрузкой 2,5 В. Сила тока в цепи стала равна 0,2 А. Найди работу, выполненную сторонними силами за 2 минуты (Дж)

- A) 40 B) 50 C) 60 D) 70 E) 80

Дано:

- $\epsilon = 2,5 \text{ В}$   
 $I = 0,2 \text{ А}$   
 $t = 2 \text{ min} = 120 \text{ с}$

Решение:

$$\epsilon = \frac{A}{q} \quad I = \frac{q}{t} \quad q = It$$

$$\epsilon = \frac{A}{It} \quad A = \epsilon It$$

$$A = 2,5 \text{ В} \cdot 0,2 \text{ А} \cdot 120 \text{ с} = 60 \text{ Дж}$$

Ответ: C) 60 Дж

2. ЭДС подключен к проводнику с сопротивлением источника 4,8 Ом при напряжении 5 В и внутренним сопротивлением 0,2 Ω. Каково падение напряжения на проводнике (В)?

- A) 10 B) 1 C) 2,8 D) 4,8 E) 5

Дано:

- $R = 4,8 \text{ Ом}$   
 $E = 0,2 \text{ Ом}$   
 $\epsilon = 5 \text{ В}$   
 $U = ?$

Решение:

$$I = \frac{\epsilon}{r+R} \rightarrow \frac{U}{R} = \frac{\epsilon}{R+r}$$

$$I = \frac{U}{R} \rightarrow U = \frac{R \cdot \epsilon}{R+r} = \frac{4,8 \cdot 5}{5} = 4,8$$

Ответ: D)

3. Цель состоит из источника тока и внешнего сопротивления. Внутреннее сопротивление источника тока равно  $r$ ,  $E = \epsilon$ , а внешнее сопротивление равно  $R$ . Если внешние сопротивление заменить другим сопротивлением  $nR$ , то во сколько раз увеличится КПД источника? Как будет выглядеть формула, если  $R=r$ ?

Дано:

$\varepsilon, r$

$R_1 = R$

$R_2 = nR$

$\frac{\eta_2}{\eta_1} = ?$

Решение:

Для обоих случаев запишем КПД источников и получим их соотношение.

$$\left\{ \begin{aligned} \eta_1 &= \frac{R}{R_1 + r} \cdot 100\% = \frac{R}{R + r} \cdot 100\% \\ \eta_2 &= \frac{R}{R_2 + r} \cdot 100\% = \frac{nR}{nR + r} \cdot 100\% \end{aligned} \right. \Rightarrow \frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{nR}{R} \cdot \frac{R + r}{nR + r} = \frac{n(R + r)}{nR + r}$$

Если  $R=r$ , приведенное выше соотношение имеет следующий вид.

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{n(R+r)}{nR+r} = \frac{2n}{n+1}$$

Ответ:  $\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{n(R+r)}{nR+r}$ ;  $\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{2n}{n+1}$

### § 16. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ПОДКЛЮЧЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Источники тока также могут быть подключены последовательно и параллельно, как при подключении проводников. В этом нас интересует вопрос нахождения результирующего ЭДС, силы тока и полного сопротивления.

**Последовательное подключение источников тока:**

Подключение источников тока к следу одного путем присоединения другого, к следу другого путем присоединения третьего и т. д. называется последовательным соединением. Другими словами, при последовательном соединении источников нет ветвления.

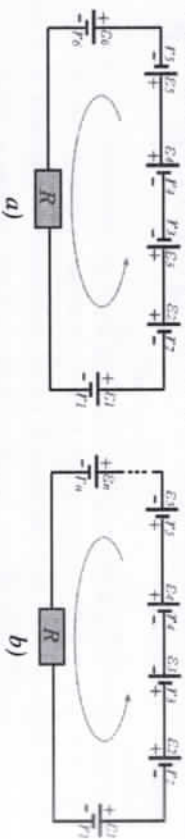


Рисунок 16.1

Пусть несколько источников тока и внешнего сопротивления соединены последовательно. Когда мы обводим контур, мы называем любое направление положительным направлением. Например, направление, противоположное часовой стрелке, мы называем положительным, и в этом направлении мы принимаем ЭДС источников, генерирующих ток, с положительным ( $\varepsilon > 0$ ) знаком, в то время как ЭДС источников, генерирующих ток по часовой стрелке, с отрицательным ( $\varepsilon < 0$ ) знаком. Другими словами, если при обведении контура по часовой стрелке и

направлении, противоположном часовой стрелке, перейти от плюса (+) источника к плюсу (-), получим ( $\varepsilon > 0$ ) и наоборот ( $\varepsilon < 0$ ) (рис. 16.1 а). В этом случае результирующее ЭДС, общее сопротивление и сила тока в закрытом контуре будут:

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_{\text{общ}} &= \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4 - \varepsilon_5 + \varepsilon_6 \\ R_{\text{общ}} &= R + r_{\text{общ}} = R + r_1 + r_2 + \dots + r_n = R + \sum_{i=1}^n r_i \\ I &= \frac{\varepsilon_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}}} \end{aligned} \right. \quad (16.1)$$

Если бы все последовательно соединенные источники были подключены одинаково (генерируя ток в одном направлении), то результирующий ЭДС этих источников был бы равен их алгебраической сумме (рис. 16.1 б).

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_{\text{общ}} &= \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \dots + \varepsilon_n = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \\ R_{\text{общ}} &= R + r_{\text{общ}} = R + r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n = R + \sum_{i=1}^n r_i \\ I &= \frac{\varepsilon_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}}} \end{aligned} \right. \quad (16.2)$$

Если в одинаковых источниках подключены последовательно в одном и том же порядке, результирующий ЭДС будет следующим:

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_{\text{общ}} &= \varepsilon + \varepsilon + \varepsilon + \dots + \varepsilon = n\varepsilon \\ R_{\text{общ}} &= R + r_{\text{общ}} = R + r + r + r + \dots + r = R + nr \\ I &= \frac{\varepsilon_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}}} = \frac{n\varepsilon}{R + nr} \end{aligned} \right. \quad (16.3)$$

Если сопротивление системы батарей значительно меньше, чем внешнее сопротивление ( $nr \ll R$ ), полезно подключать батареи последовательно, то есть таким образом можно получить максимальную силу тока.

$$I \approx \frac{n\varepsilon_0}{R} \quad (16.4)$$

Интересно подключать аккумуляторы последовательно, когда внешнее сопротивление намного меньше внутреннего сопротивления источника, т. е. ( $nr \ll R$ ) сила тока, получаемого при этом, будет равна току короткого замыкания одного источника.

$$I = \frac{n\varepsilon}{R+n r} \approx \frac{n\varepsilon}{n r} = \frac{\varepsilon}{r} = I_0 \quad (16.5)$$

**Параллельное подключение источников тока:**

Когда (+) полюса источников тока соединены в один узел, а (-) полюса соединены в один узел, такое соединение называется параллельным соединением.

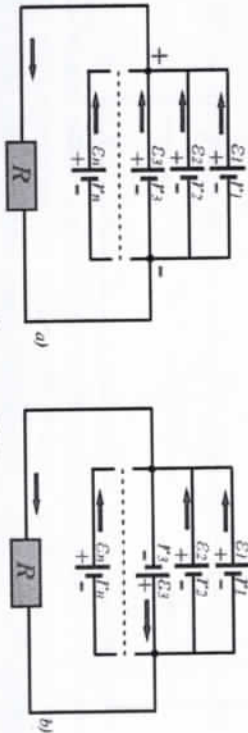


Рисунок 16.2

При параллельном подключении источников тока результирующая ЭДС системы батарей, суммарное сопротивление и сила тока во внешнем соединении будут следующими (рис. 16.2 а):

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{общ}} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \dots + \varepsilon_n}{r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n} \\ R_{\text{общ}} = R + r_{\text{общ}} \\ \frac{1}{r_{\text{общ}}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n} \\ I = \frac{\varepsilon_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}}} \end{cases} \quad (16.6)$$

Если полюса любого из источников тока соединены взаимозаменяемо, то для этого источника принимается  $\varepsilon < 0$  (рис. 16.2 б):

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{общ}} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \dots + \varepsilon_n}{r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n} \\ R_{\text{общ}} = R + r_{\text{общ}} \\ \frac{1}{r_{\text{общ}}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n} \\ I = \frac{\varepsilon_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}}} \end{cases} \quad (16.7)$$

При параллельном подключении  $n$  одинаковых источников результирующее ЭДС, общее сопротивление и сила тока во внешнем соединении будут:

$$r_{\text{общ}} = \frac{r}{n}, \quad R_{\text{общ}} = R + r_{\text{общ}} = R + \frac{r}{n}, \quad I = \frac{\varepsilon_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}}} = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{n}} = \frac{n\varepsilon}{nR + r} \quad (16.7)$$

Посмотрим, как будет выглядеть приведенная выше формула, если последовательно подключаться один и те же источники. Здесь

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \dots = \varepsilon_n = \varepsilon$$

будет. В то время как результирующий ЭДС

$$r_{\text{общ}} = \frac{r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n}{n} = \frac{r + r + r + \dots + r}{n} = \frac{n r}{n} = r, \quad \frac{1}{r_{\text{общ}}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \dots + \frac{1}{r} = \frac{n}{r}, \quad \rightarrow \varepsilon_{\text{общ}} = \varepsilon$$

будет.

Следовательно, если ЭДС источника, подключенного параллельно  $n$ , равен, то результирующий ЭДС будет:

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \varepsilon \quad (16.8)$$

Далее посмотрим на источники, внутреннее сопротивление которых одинаково, а внутреннее-разное. Здесь

$$r_1 = r_2 = r_3 = \dots = r_n = r$$

будет. Следовательно, общее внутреннее сопротивление системы батарей будет.

$$r_{\text{общ}} = \frac{r}{n}$$

Результирующий ЭДС имеет вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{общ}} &= \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \dots + \varepsilon_n}{r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \dots + \varepsilon_n}{n r} = \frac{1}{r} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \dots + \varepsilon_n) \rightarrow \frac{\varepsilon_{\text{общ}}}{n} = \\ &= \frac{1}{r} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \dots + \varepsilon_n), \quad \rightarrow \varepsilon_{\text{общ}} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \dots + \varepsilon_n}{n} \end{aligned}$$

Следовательно, если внутреннее сопротивление источника, подключенного параллельно  $n$ , равны, то результирующий ЭДС будет:

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \dots + \varepsilon_n}{n} \quad (16.9)$$

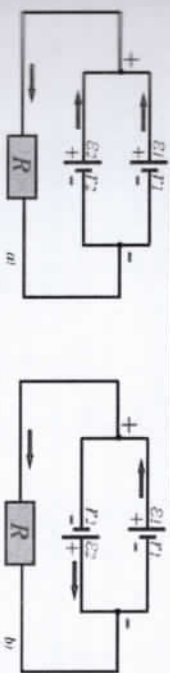


Рисунок 16.3

Если к внешнему источнику подключить два параллельно соединенных между собой разных источника, то результирующий ЭДС будет выглядеть следующим образом (рис. 16.3 а):

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \frac{\varepsilon_1 r_2 + \varepsilon_2 r_1}{r_1 + r_2} \quad (16.10)$$

Если применить вышеприведенную формулу для источников с разными значениями ЭДС, но одинаковыми внутренними сопротивлениями, то получим следующее выражение:

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \quad (16.11)$$

Если к внешнему источнику подключить два взаимно противоположно параллельных разных источника, то результирующий ЭДС будет выглядеть следующим образом (рис. 16.3 б):

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \frac{\varepsilon_1 r_2 - \varepsilon_2 r_1}{r_1 + r_2} \quad (16.12)$$

Если применить вышеприведенную формулу для источников с разными значениями ЭДС, но одинаковыми внутренними сопротивлениями, то получим следующее выражение:

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \quad (16.13)$$

С вопросами, связанными с подключением источников, мы часто сталкиваемся при изучении законов Кирхгофа. В нем даже в смешанных соединениях можно будет определить силу тока, проходящего через произвольный источник, и падение напряжения на нем.

**Вопросы по теме:**

1. Что называется последовательным подключением источников? Каков общий ЭДС в этом?
2. Как определяется общее сопротивление и общая сила тока при последовательном соединении источников? Как насчет тех же ресурсов?
3. Что называется параллельным соединением источников? Каков общий ЭДС в этом?
4. Как определяется общее сопротивление и суммарная сила тока при параллельном соединении источников? Как насчет тех же ресурсов?
5. Каким будет результирующий ЭДС двух источников, подключенных параллельно, как прямых, так и обратных? Какова эта формула, когда внутреннее сопротивление одинаковы?
6. Чему равен суммарный ЭДС при параллельном соединении источников постоянного тока с разными ЭДС и сопротивлениями. Что делать, если они подключены в обратном направлении?
7. Чему равен общий ЭДС при параллельном соединении источников постоянного тока с разными ЭДС и одинаковыми сопротивлениями. Что делать, если они подключены в обратном направлении?

**Решение задачи:**

1. ЭДС  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 12 \text{ В}$  и внутреннее сопротивление источников тока на рисунке равны  $r_1 = 0,16 \text{ Ом}$ ,  $r_2 = 0,12 \text{ Ом}$ . Источники тока и резисторы  $R$  соединены последовательно. При каком значении сопротивления  $R$  разность потенциалов на полюсах одного из источников будет равна нулю? Какой это источник тока?

**Дано:**

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 12 \text{ В}$$

$$r_1 = 0,16 \text{ Ом}$$

$$r_2 = 0,12 \text{ Ом}$$

$$R = ?$$

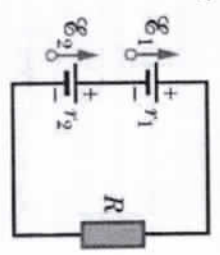
**Решение:**

Предположим, что напряжение на полюсах источника 1 равно нулю.

$$U_1 = \varepsilon_1 - I r_1 \rightarrow \varepsilon_1 = I r_1 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{R + r_1 + r_2} r_1 \rightarrow$$

$$R = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\varepsilon_1} r_1 - (r_1 + r_2) = \frac{\varepsilon_1 r_1 + \varepsilon_2 r_1 - \varepsilon_1 r_1 - \varepsilon_2 r_1}{\varepsilon_1} =$$

$$= \frac{\varepsilon_2 r_1 - \varepsilon_1 r_2}{\varepsilon_1} = r_1 - r_2 = 0,16 - 0,12 = 0,04 \text{ Ом}$$



Следовательно, мы получаем этот ответ, потому что ответ, полученный в этом, положительный. Если бы образовалась отрицательное число, то мы бы продолжили вычисления для источника 2. Также стоит отметить отметить, что в таких вопросах разность потенциалов на полюсах будет равна нулю только у одного из источников тока. Таким образом, разность потенциалов на полюсах источника 1 становится нулевой, когда  $R = 40 \text{ мОм}$  в данной задаче.

**Ответ:**  $R = 40 \text{ мОм}$

### § 17. ЗАКОНЫ КИРХГОФА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ИЗ НИХ

Если электрические цепи разветвлены, то из-за того, что величина и направление сил тока, проходящего через отдельные участки этих цепей, различны, вычислить их по прямому закону Ома довольно сложно. Выход из такой сложной ситуации легко решить на основе двух законов, впервые сформулированных немецким физиком Кирхгофом в 1847 году.

**Закон Кирхгофа:**

Для точки Кирхгофа: алгебраическая сумма токов, встречающихся в узле электрической цепи, равна нулю, т. е. сумма токов, приходящих в узел, равна сумме токов, уходящих от узла (рис. 17.1).

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 \quad \text{или} \quad I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5 \quad (17.1)$$

Здесь:  $n$ -количество токов, встречающихся в узле, и только тогда, когда  $n \geq 3$ , образуется узел.



Рисунок 17.1

Поскольку 1-й закон Кирхгофа относится к токам, встречающимся в узле, этот закон также называется законом узлов. 1-й закон Кирхгофа является следствием закона сохранения зарядов (рисунок 17.1)

2-й закон Кирхгофа: сумма ЭДС источников тока в произвольном замкнутом контуре разветвленной электрической цепи всегда равна сумме падений напряжения на сопротивлениях.

$$\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i = \sum_{i=1}^n U_i \quad \text{или} \quad \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i = \sum_{i=1}^n I_i R_i \quad (17.2)$$

Здесь также следует учитывать падения напряжения на внутренних сопротивлениях источников тока.

2-й закон Кирхгофа - для закрытого контура разветвленной электрической цепи, поэтому этот закон также называют законом контуров. 2-й закон Кирхгофа является следствием закона сохранения энергии.

При использовании 2-го закона Кирхгофа необходимо будет соблюдать следующие условия:

1. Токи, направление которых совпадает с выбранным направлением вращения, называются положительными токами, а противоположные - отрицательными токами;
2. При переходе тока от полюса (-) источника к полюсу (+) при обходе контура в выбранном направлении ЭДС источника принимается положительным ( $\mathcal{E} > 0$ ), а наоборот-отрицательным ( $\mathcal{E} < 0$ ).

Например, для замкнутого контура в ABCDA разветвленной электрической цепи, изображенной на рис. 17.2, 1-й и 2-й закон Кирхгофа записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} A: I_A - I_1 - I_4 &= 0, & B: I_1 - I_2 - I_3 &= 0 \\ C: I_2 + I_3 - I_C &= 0, & D: I_D + I_4 - I_1 &= 0 \\ ABCD: \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 - \mathcal{E}_4 &= I_1(R_1 + r_1) + I_2(R_2 + r_2) - \\ &- I_3(R_3 + r_3) - I_4(R_4 + r_4) \end{aligned}$$

(17.3)

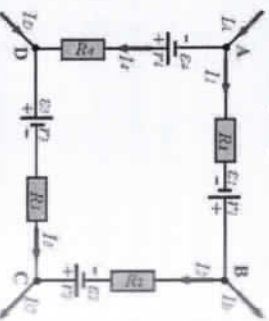


Рисунок 17.2

Таким образом, оказывается, используя два закона Кирхгофа, можно вычислить и неизвестные величины в любой сложной разветвленной электрической цепи.

**Выводы из законов Кирхгофа:**

Мы можем вывести частные формулы для некоторых из наиболее распространенных задач, используя законы Кирхгофа.



Рисунок 17.3

При соединении двух параллельно соединенных различных источников с внутренним сопротивлением  $R$  силы тока, проходящего через каждый элемент, будут следующими (рис. 17.3-а):

$$\begin{cases} \mathcal{E}_{\text{общ}} = \frac{\mathcal{E}_1 \cdot r_2 + \mathcal{E}_2 \cdot r_1}{r_1 + r_2} \\ R_{\text{общ}} = R + r_{\text{общ}} = R + \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} \\ I_{\text{общ}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}}} \end{cases} \quad \begin{cases} I_1 = \frac{\mathcal{E}_1 - I \cdot R}{r_1} \\ I_2 = \frac{\mathcal{E}_2 - I \cdot R}{r_2} \\ I_{\text{общ}} = I_1 + I_2 \end{cases} \quad (17.4)$$

При подключении к внешнему сопротивлению  $R$  двух различных источников, соединенных между собой обратно параллельно, силы тока, проходящего через каждый элемент, будут следующими (рис. 17.3-б):

$$\begin{cases} \mathcal{E}_{\text{общ}} = \frac{\mathcal{E}_1 \cdot r_2 - \mathcal{E}_2 \cdot r_1}{r_1 + r_2} \\ R_{\text{общ}} = R + r_{\text{общ}} = R + \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} \\ I_{\text{общ}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}}} \end{cases} \quad \begin{cases} I_1 = \frac{\mathcal{E}_1 - I \cdot R}{r_1} \\ I_2 = \frac{\mathcal{E}_2 + I \cdot R}{r_2} \\ I_{\text{общ}} = I_1 - I_2 \end{cases} \quad (17.5)$$



Рисунок 17.4

Для цепи, изображенной на рисунке 17.4, 2-й закон Кирхгофа будет иметь вид

$$\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = I \cdot (R_1 + R_2 + r_1 + r_2), \quad \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = I \cdot (R_1 + R_2 + r_1 + r_2) \quad (17.6)$$





Рисунок 17.5

Для цепи, изображенной на рис. 17.5-а, силы тока можно определить, используя оба закона Кирхгофа. 2-й закон Кирхгофа для верхнего I-го контура, нижнего II-го контура и внешнего контура на рисунке.,

$$\varepsilon_1 = I_1 r_1 + I R, \quad \varepsilon_2 = I_2 r_2 + I R, \quad \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = I_1 r_1 - I_2 r_2$$

используя формулы, 1-й закон Кирхгофа для узла, можно сформировать формулу  $I = I_1 + I_2$ . Формулу  $I = I_1 + I_2$  помещая в формулы, выведенные для I- и II-контуров получаем систему

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = I_1 r_1 + I R, & \varepsilon_2 = I_2 r_2 + I R \\ \varepsilon_1 = I_1 r_1 + (I_1 + I_2) R = I_1 (r_1 + R) + I_2 R \\ \varepsilon_2 = I_2 r_2 + (I_1 + I_2) R = I_1 R + I_2 (r_2 + R) \end{cases}$$

Из уравнения I системы получаем

$$I_2 = \frac{\varepsilon_1}{R} - \frac{r_1 + R}{R} I_1$$

если мы поместим его в уравнение 2

$$\varepsilon_2 = I_1 R + I_2 (r_2 + R) = I_1 R + \left( \frac{\varepsilon_1}{R} - \frac{r_1 + R}{R} I_1 \right) (r_2 + R)$$

уравнение формируется. Умножим R на обе стороны,

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 R &= I_1 R^2 + \varepsilon_1 (r_2 + R) - (r_1 + R)(r_2 + R) I_1, \quad \rightarrow \varepsilon_2 R - \varepsilon_1 (r_2 + R) = \\ &= (R^2 - r_1 r_2 - (r_1 + r_2) R - R^2) I_1, \quad \rightarrow (r_1 r_2 + (r_1 + r_2) R) I_1 = \varepsilon_1 (r_2 + R) - \varepsilon_2 R, \quad \rightarrow \\ &\rightarrow I_1 = \frac{\varepsilon_1 r_2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) R}{r_1 R + r_1 r_2 + r_2 R} \end{aligned}$$

Получается сила тока проходящего от I-го источника.

А для силы тока, проходящего через 2 ой источник, следует выражение.

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{\varepsilon_1}{R} - \frac{r_1 + R}{R} I_1 = \frac{\varepsilon_1}{R} - \frac{r_1 + R}{R} \cdot \frac{\varepsilon_1 r_2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) R}{r_1 R + r_1 r_2 + r_2 R} = \\ &= \frac{\varepsilon_1 r_1 R + \varepsilon_1 r_1 r_2 + \varepsilon_1 r_2 R - \varepsilon_1 r_1 R - \varepsilon_1 r_1 R^2 + \varepsilon_2 r_1 R + \varepsilon_2 R^2}{r_1 R + r_1 r_2 + r_2 R} = \frac{\varepsilon_2 r_1 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) R}{r_1 R + r_1 r_2 + r_2 R} \end{aligned}$$

Возникает из-за силы тока в сопротивлении.

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 = \frac{\varepsilon_1 r_2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) R}{r_1 R + r_1 r_2 + r_2 R} + \frac{\varepsilon_2 r_1 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) R}{r_1 R + r_1 r_2 + r_2 R} = \frac{\varepsilon_1 r_2 + \varepsilon_1 R - \varepsilon_2 R + \varepsilon_2 r_1 + \varepsilon_2 R - \varepsilon_1 R}{r_1 R + r_1 r_2 + r_2 R} = \\ &= \frac{\varepsilon_1 r_2 + \varepsilon_2 r_1}{r_1 R + r_1 r_2 + r_2 R} \end{aligned}$$

Таким образом, для цепи, изображенной на рисунке 17.5-а, законы Кирхгофа III и силы тока будут такими, что:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = I_1 r_1 + I R \\ \varepsilon_2 = I_2 r_2 + I R \\ \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = I_1 r_1 - I_2 r_2 \\ I = I_1 + I_2 \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} I_1 = \frac{\varepsilon_1 r_2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) R}{r_1 R + r_1 r_2 + r_2 R} \\ I_2 = \frac{\varepsilon_2 r_1 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) R}{r_1 R + r_1 r_2 + r_2 R} \\ I = \frac{\varepsilon_1 r_2 + \varepsilon_2 r_1}{r_1 R + r_1 r_2 + r_2 R} \end{cases} \quad (17.7)$$

Используя приведенную выше формулу, мы можем определить случай, когда сила тока в одном из источников (или напряжение на полюсах этого источника) становится равной нулю. Чем меньше ток любого из двух источников, тем выше вероятность того, что ток, проходящий через этот источник, станет нулевым. Пусть,  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$  допустим, сила тока  $I_2$  становится равной нулю  $\varepsilon_2 r_1 = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) R$ . Отсюда значение внешнего сопротивления

$$R = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} r_1 \quad (17.8)$$

возникает при  $I_2 = 0$  или  $U_2 = 0$ . Таким образом, ток  $I = I_1$  17.5-а вращается по контуру выше на рисунке.

Для цепи, изображенной на рис. 17.5-б, силы тока можно определить, используя оба закона Кирхгофа. Используя 2-й закон Кирхгофа для верхнего I-го контура, нижнего II-го контура и внешнего контура на рисунке, получаем формулы

$$\varepsilon_1 = I_1 r_1 + I R, \quad \varepsilon_2 = I_2 r_2 - I R, \quad \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = I_1 r_1 + I_2 r_2$$

Используя 1-й закон Кирхгофа для узла, можно сформулировать формулу  $I = I_1 - I_2$ . Помещая формулу  $I = I_1 - I_2$  в формулы, выведенные для I- и II-контуров,

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = I_1 r_1 + I R, & \varepsilon_2 = I_2 r_2 - I R \\ \varepsilon_1 = I_1 r_1 + (I_1 - I_2) R = I_1 (r_1 + R) - I_2 R \\ \varepsilon_2 = I_2 r_2 - (I_1 - I_2) R = -I_1 R + I_2 (r_2 + R) \end{cases}$$

Получаем систему. Из уравнения I системы находим

$$I_2 = \frac{r_1 + R}{R} I_1 - \frac{\varepsilon_1}{R}$$

если мы поместим его в уравнение 2, сформируются следующие уравнение.

$$\varepsilon_2 = -I_1 R + I_2 (r_2 + R) = -I_1 R + \left( \frac{r_1 + R}{R} I_1 - \frac{\varepsilon_1}{R} \right) (r_2 + R)$$

Умножим на R обе стороны уравнения,

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 R &= -I_1 R^2 + (r_1 + R)(\varepsilon_2 + R)I_1 - \varepsilon_1(\varepsilon_2 + R) \rightarrow \varepsilon_2 R + \varepsilon_1(\varepsilon_2 + R) = \\ &= (-R^2 + r_1 \varepsilon_2 + (r_1 + \varepsilon_2)R + R^2)I_1 \rightarrow (r_1 \varepsilon_2 + (r_1 + \varepsilon_2)R)I_1 = \varepsilon_1(\varepsilon_2 + R) + \varepsilon_2 R \rightarrow \\ &\rightarrow I_1 = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)R}{r_1 R + r_1 \varepsilon_2 + r_2 R} \end{aligned}$$

Получается сила тока проходящего от 1-го источника тока. Получается сила тока проходящего от 2-го источника тока

$$I_2 = \frac{\varepsilon_1 + R}{R} I_1 - \frac{\varepsilon_1}{R} = \frac{\varepsilon_1 + R}{R} \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)R}{r_1 R + r_1 \varepsilon_2 + r_2 R} - \frac{\varepsilon_1}{R} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_1 r_1 R + \varepsilon_1 r_2 R + \varepsilon_1 R^2 + \varepsilon_2 r_1 R + \varepsilon_2 r_2 R - \varepsilon_1 r_1 R - \varepsilon_1 r_2 R - \varepsilon_1 R^2 - \varepsilon_1 R}{r_1 R + r_1 \varepsilon_2 + r_2 R} = \frac{\varepsilon_2 r_1 + (\varepsilon_2 + \varepsilon_1)R}{r_1 R + r_1 \varepsilon_2 + r_2 R}$$

Возникает сила тока в сопротивлении.

$$I = I_1 - I_2 = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)R}{r_1 R + r_1 \varepsilon_2 + r_2 R} - \frac{\varepsilon_2 r_1 + (\varepsilon_2 + \varepsilon_1)R}{r_1 R + r_1 \varepsilon_2 + r_2 R} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 - \varepsilon_2 r_1}{r_1 R + r_1 \varepsilon_2 + r_2 R}$$

Таким образом, для цепи, изображенной на рис. 17.5-б, законы Кирхгофа III и силы тока будут такими, что:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = I_1 r_1 + I R \\ \varepsilon_2 = I_2 r_2 - I R \\ \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = I_1 r_1 + I_2 r_2 \\ I = I_1 - I_2 \end{cases}$$

уюкі

$$\begin{cases} I_1 = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)R}{r_1 R + r_1 \varepsilon_2 + r_2 R} \\ I_2 = \frac{\varepsilon_2 r_1 + (\varepsilon_2 + \varepsilon_1)R}{r_1 R + r_1 \varepsilon_2 + r_2 R} \\ I = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 - \varepsilon_2 r_1}{r_1 R + r_1 \varepsilon_2 + r_2 R} \end{cases}$$

(17.9)

Как видно из приведенной выше формулы, всегда будет  $I_1 > 0$ ,  $I_2 > 0$ , если ток проходит через источники. Но есть вероятность, что ток не пройдет через внешнее сопротивление  $R$ . Для этого  $I = 0$ ,

$$\varepsilon_1 \varepsilon_2 = \varepsilon_2 r_1 \rightarrow \frac{\varepsilon_1}{r_1} = \frac{\varepsilon_2}{r_2}$$

то есть получается. Вот тогда  $I = 0$  или  $U_R = 0$  и  $I_1 = I_2$  будет.

Итак, рис. 17.5-в, если ток не проходит через сопротивление  $R$  при выполнении следующего условия для цепи, изображенной на рисунке.

$$\frac{\varepsilon_1}{r_1} = \frac{\varepsilon_2}{r_2} \quad (17.10)$$

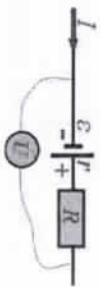


Рисунок 17.6

Во время разряда аккумулятора напряжение на его полюсах меньше, чем у источника. Потому что падение напряжения происходит внутри источника за счет внутреннего сопротивления источника.

На рисунке 17.6 показан процесс разрядки аккумулятора, при котором показания вольтметра будут следующими:

$$U = \varepsilon - I r, \quad U = \varepsilon - I(R + r) \quad (17.11)$$



Рисунок 17.7

Во время зарядки аккумулятора направление зарядного тока должно быть направлено в сторону (+) полюса источника, т. е. полюса источника зарядка соединяются соответствующим образом с полюсами источника аккумулятора. Кроме того, напряжение на полюсах источника должно быть больше, чем ЭДС источника. Потому что принудительное введение заряда в источник возможно только в том случае, если потенциал на полюсах зарядного устройства источника больше, чем потенциал на полюсах источника.

Рисунок 17.7 процесс зарядки аккумулятора, при котором показания вольтметра будут следующими:

$$U = \varepsilon + I r, \quad U = \varepsilon + I(R + r) \quad (17.12)$$

Если известны сила тока при зарядке аккумулятора  $I_0$ , напряжение на полюсах аккумулятора  $U_2$  и сила тока при разрядке (разрядке)  $I_0$ , напряжение на полюсах аккумулятора  $U_1$ , то можно определить ЭДС и внутреннее сопротивление аккумулятора. Напряжения на полюсах аккумулятора в момент зарядки и разрядки равна:

$$\begin{cases} U_2 = \varepsilon + I_2 r \\ U_1 = \varepsilon - I_1 r \end{cases}$$

Вычитая их из одного второе, найдем внутреннее сопротивление аккумулятора.

$$U_2 - U_1 = I_2 r + I_1 r \rightarrow r = \frac{U_2 - U_1}{I_2 + I_1}$$

Поместив это найденное значение в произвольное одно из уравнений системы, скажем, во второе, определяется ЭДС аккумулятора.

$$\varepsilon = U_1 + I_1 r = U_1 + I_1 \frac{U_2 - U_1}{I_2 + I_1} = \frac{U_1 I_2 + U_1 I_1 + U_2 I_1 - U_1 I_1}{I_2 + I_1}$$

Таким образом, оказывается, что если известны силы тока и напряжения на полюсах в момент заряда и разряда аккумулятора, то можно определить ЭДС и внутреннее сопротивление аккумулятора.

$$\varepsilon = \frac{U_1 I_1 + U_2 I_2}{I_1 + I_2}, \quad r = \frac{U_1 - U_2}{I_1 + I_2} \quad (17.13)$$

Все частные формулы, которые мы привели выше, являются результатом законов Кирхгофа, с помощью которых можно объяснить неизвестные величины в произвольной сложной цепи.

**Вопросы по теме:**

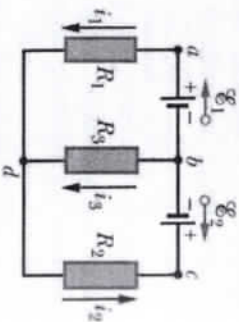
1. Опишите 1-й закон Кирхгофа и запишите его формулу.
2. Опишите 2-й закон Кирхгофа и запишите его формулу.
3. Какие законы сохранения являются следствием законов Кирхгофа?
4. Какое напряжение на полюсах при зарядке аккумулятора?
5. Какое напряжение на полюсах при разрядке аккумулятора?

**Решение задачи:**

1. Чему равна разность потенциалов  $\varphi_d - \varphi_c$  между точками  $d$  и  $c$  в цепи на рисунке? В этом случае ЭДС идеальных батарей  $\varepsilon_1 = 4V$ ,  $\varepsilon_2 = 1V$  а внешние сопротивления равны  $R_1 = R_2 = 10\Omega$  и  $R_3 = 8\Omega$ .

**Дано:**  
 $\varepsilon_1 = 4V$   
 $\varepsilon_2 = 1V$   
 $R_1 = 10\Omega$   
 $R_2 = 10\Omega$   
 $R_3 = 8\Omega$   
 $\varphi_d - \varphi_c = ?$

**Решение:**  
 Работаем, используя законы Кирхгофа. На этом строим уравнения для  $d$ -го и для левого и правого контуров.



$$\begin{cases} i_2 = i_1 + i_3 \\ \varepsilon_1 = i_1 R_1 - i_2 R_3 \\ \varepsilon_2 = -i_2 R_2 - i_3 R_3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_1 = i_2 - i_3 \\ 4 = 10i_1 - 8(i_2 - i_3) \\ 1 = -10i_2 - 8(i_2 - i_3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} 4 = 10i_1 - 8i_2 + 8i_3 \\ 1 = -10i_2 - 8i_2 + 8i_3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 9i_1 - 4i_2 = 2 \\ 8i_1 - 18i_2 = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_1 = \frac{16}{65} A \\ i_2 = i_1 - i_3 = \frac{7}{130} - \frac{16}{65} = -\frac{25}{130} = -\frac{5}{26} A \\ i_3 = \frac{7}{130} A \end{cases}$$

Между точками  $d$  и  $c$  будет разность потенциалов  $\varphi_d - \varphi_c = U_2$ . И здесь:

$$U_2 = i_2 R_2 = \frac{7}{130} \cdot 8 = \frac{28}{65} V \approx 0,43V$$

Ответ: 0,43 В



**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ГЛАВЕ II**

Лабораторная работа: №1.

Определение удельного сопротивления проводника

**Цель работы:** Определение удельного сопротивления проводника.

**Необходимые инструменты и оборудование:**

Лабораторный универсальный амперметр, вольтметр, реостат, штангенциркуль, набор проводов с разными сопротивлениями и соединительные провода.

**Краткие теоретические сведения**

Сопротивление проводника препятствовать прохождению электрического тока называют его сопротивлением. Сопротивление зависит от материала проводника, его длины, поперечного сечения и температуры

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1) \quad S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (2)$$

$R$  – сопротивление проводника

$l$  – длина

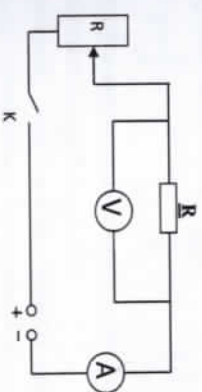
$S$  – площадь сечения проводника

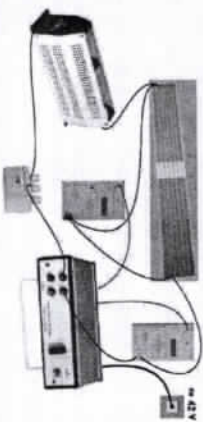
$d$  – диаметр проводника

$\rho$  – удельное сопротивление вещества проводника

Удельное сопротивление проводника  $\rho$  численно равно сопротивлению проводника, имеющего длину  $l$  м и площадь поперечного сечения  $1m^2$ . Единицей удельного сопротивления является  $1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Удельное сопротивление зависит от рода вещества и температуры. Используя формулы 1,2,3 мы можем вывести формулу 4

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (3) \quad \rho = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot U}{4l \cdot I} \quad (4)$$





### Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с инструкцией по выполнению лабораторных работ.
2. Определите длину и диаметр проводника с помощью линейки и микрометра.
3. Подключите проводник заданной длины к электрической сети с помощью специальных зажимов,
4. Подключите выключатель и измерьте силу тока и напряжение в проводнике.
5. На основании полученных результатов рассчитать удельное сопротивление проводника.
6. Проведя опыт 3-4 раза, внесите полученные значения в таблицу.
7. Определить среднее значение удельного сопротивления.
 
$$\rho_{\text{ср}} = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_n}{n}$$
8. Определим абсолютную погрешность по формуле
 
$$\Delta\rho = \rho_0 \cdot r - \rho$$

9. Определить среднее значение абсолютной погрешности

10. Определить относительную погрешность измерения

$$\varepsilon = \frac{\Delta\rho_{\text{ср}}}{\rho_{\text{ср}}} \cdot 100\%$$

11. Выразите результат эксперимента следующим образом

$$\rho = \rho_{\text{ср}} \pm \Delta\rho_{\text{ср}}$$

12. Определите, что это за вещество

13. Заполнить таблицу.

№	$d$ [мм]	$S$ [мм <sup>2</sup> ]	$L$ [м]	$U$ [В]	$R_x$ [Ω]	$\rho_x$ [ $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}}{\text{м}}$ ]	$\bar{\rho}$	$\Delta\rho$	$\overline{\Delta\rho}$	$\varepsilon = \frac{\overline{\Delta\rho}}{\bar{\rho}} \cdot 100\%$
1										
2										
3										

$\rho = \bar{\rho} \pm \overline{\Delta\rho}$

### Контрольные вопросы

1. Напишите формулу расчета сопротивления для проводников, имеющих правильную геометрическую форму и объясните ее.
2. Что называется удельным сопротивлением проводника? От каких размеров он зависит?

Лабораторная работа №2.

Закон Ома для участка цепи.

Цель работы: Построить вольт-амперную характеристику проводящего сопротивления.

Необходимые инструменты и оборудование:

Источник тока, амперметр, вольтметр, набор резисторов, переключатель и соединительные провода.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

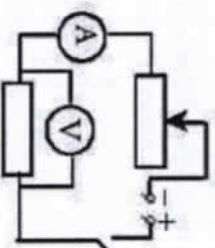
Закон Ома для однородного участка цепи: сила тока в проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника.

$$I = \frac{U}{R}$$

Назван в честь Георга Ома.

Электрическое сопротивление.

Согласно классической электронной теории, движение свободных электрических зарядов, создающих электрический ток, не происходит беспрепятственно. В металлических проводниках электроны проводимости сталкиваются с ионами, создавая тепловые колебания около своих положений равновесия, теряют скорость упорядоченного движения и отдают этим частям часть своей кинетической энергии. Затем электроны снова



разгоняются электрическим полем, снова сталкиваются с ионами, тормозятся и т.д. Вследствие этого уменьшается и сила тока в проводнике.

Свойство проводника препятствовать прохождению электрического тока называют его сопротивлением. Сопротивление зависит от материала проводника, его длины, поперечного сечения и температуры

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где:  $R$  – сопротивление проводника,  $l$  – длина,  $S$  – площадь сечения проводника,  $\rho$  – удельное сопротивление вещества проводника.

За единицу сопротивления  $R$  в системе СИ принимают  $1 \text{ Ом}$ .

$1 \text{ Ом}$  – это сопротивление такого проводника, по которому течет ток  $I$ , если на его концах поддерживается напряжение  $1 \text{ В}$ .

$$1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}}.$$

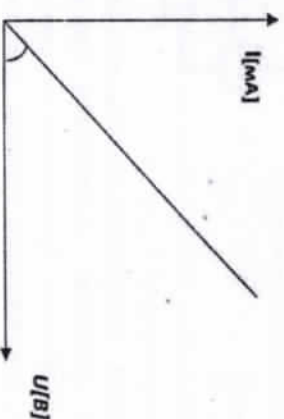
Удельное сопротивление проводника  $\rho$  численно равно сопротивлению проводника имеющего длину  $1 \text{ м}$  и площадь поперечного сечения  $1 \text{ м}^2$ .

Единицей удельного сопротивления является  $1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Удельное сопротивление зависит от рода вещества и температуры.

Порядок выполнения работ

1. Ознакомиться с инструкцией по выполнению лабораторных работ.
2. Составить электрическую схему.
3. Составить таблицу.
4. Увеличиваем напряжение с 0 до 8 В.
5. Определив, что показывают амперметр и вольтметр, заносим его в таблицу.
6. Проведем график зависимости между силой тока и напряжением.
7. Проанализируйте результаты и сделайте выводы.



№	$U$ [В]	$I, \cdot 10^{-3}$ [А]	$R_i$ [Ом]	$\bar{R}$	$\Delta R_i$	$\overline{\Delta R}$	$\varepsilon = \frac{\overline{\Delta R}}{\bar{R}} \cdot 100\%$
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							

$R = \bar{R} \pm \Delta R$

Назвать sawallari

### Контрольные вопросы

1. Что такое электрический ток?
2. Дайте определение силы тока. Как обозначается? По какой формуле вычисляется?
3. Какова единица измерения силы тока?
4. Каким прибором измеряется сила тока? Как он включается в электрическую цепь?
5. Дайте определение напряжения. Как обозначается? По какой формуле вычисляется?
6. Какова единица измерения напряжения?
7. Каким прибором измеряется напряжение? Как он включается в электрическую цепь?
8. Дайте определение сопротивления. Как обозначается? По какой формуле вычисляется?
9. Какова единица измерения сопротивления?
10. Сформулируйте закон Ома для участка цепи.

Лабораторная работа №3.

Последовательное, параллельное и смешанное соединение проводников.

Цель работы: Изучить на практике последовательное и параллельное соединение резисторов и проверить результаты с помощью омметра.

Необходимые инструменты и оборудование: Амперметр, вольтметр, различные резисторы, реостат, источник постоянного тока, соединительные провода.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Проводники могут быть последовательными, параллельными и смешанными. при последовательном соединении проводники соединяются один за другим

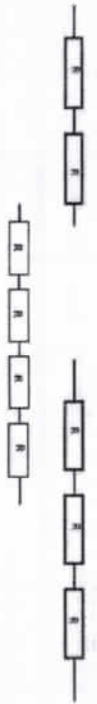


Рисунок 1

При таком соединении общее сопротивление цепи определяется как:

$$R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

При таком соединении общее сопротивление цепи определяется так: при параллельном соединении проводников один их конец соединяется с одной точкой, а другой - со второй:

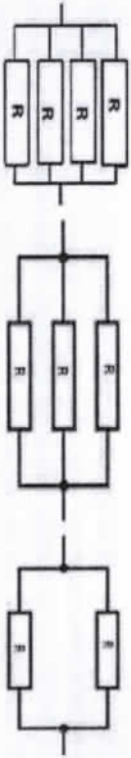


Рисунок 2

При таком соединении общее сопротивление в цепи находится по формуле:

$$\frac{1}{R_{\text{общ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$$

**Порядок выполнения работы:**

1. Составим электрическую цепь для резисторов последовательного, параллельного и смешанного действия.
2. Приведем общие формулы для последовательных, параллельных, промежуточных соединений для теоретических расчетов.
3. С помощью омметра сравним значения суммарного сопротивления с экспериментальными и теоретическими значениями.
4. Построим вторую цепочку и сравним для нее значения как в эксперименте, так и в теории.
5. Проведем опыт по шести схемам.

Последовательное-кет соединение				
$n$	$R_1$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
$n_1$				
$n(1-2)$				
$n(1-3)$				
$n(1-4)$				
$n1,4$				
$n2,3$				
$n3,4$				

Параллельно соединение				
$R$	$R_1$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
$R_1$				
$R(1-2)$				
$R(1-3)$				
$R(1-4)$				
$R1,4$				
$R2,3$				
$R3,4$				

№	$R_1 = 208 \text{ Ом}; R_2 = 208 \text{ Ом}; R_3 = 204 \text{ Ом}; R_4 = 204 \text{ Ом}$	
	Теоретическое значение	Лабор-ные значение
1		
2		
3		
4		
5		
6		

Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока

- Цель работы: 1. Изучение закона Ома для замкнутого цепи  
2. Изучение II правила Кирхгофа на опыте.

Необходимые инструменты и оборудование: Источник постоянного тока, электрические сопротивления, амперметр, вольтметр.

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

Согласно закону Ома для полной цепи ЭДС источника, его внутреннее сопротивление, сила тока в цепи и сопротивления внешней цепи связаны соотношением:

$$I = \frac{\epsilon}{R+r}$$

Если к исследуемому источнику тока подключить поочередно два резистора с разными сопротивлениями, то, измеряя при этом силу тока в обих случаях, можно записать два уравнения из которых легко вычислить ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока:

$$I = \frac{\epsilon}{R_1+r} \quad \text{и} \quad I_1 = \frac{\epsilon}{R_1+r}$$

$$I_1 R_1 + I_1 r = I_2 R_2 + I_2 r$$

$$r = \frac{I_2 R_2 - I_1 R_1}{I_1 - I_2}$$

$$\epsilon = I_1 (R_1 + r)$$

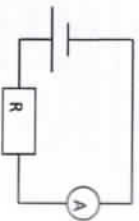
$$\text{или} \quad r = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2}$$

$$\epsilon = U_2 + I_2 r = U_1 + I_1 r$$

**Порядок выполнения работы**

1. Соберите электрическую цепь с резистором  $R_1$  по схеме, представленной на рисунке. Измерьте силу тока.

$$I = \frac{\epsilon}{R_1+r} \quad \text{и} \quad I_1 = \frac{\epsilon}{R_1+r}$$



Решая совместно эти уравнения, получим:

$$I_1 R_1 + I_1 r = I_2 R_2 + I_2 r$$

$$r = \frac{I_2 R_2 - I_1 R_1}{I_1 - I_2}$$

$$\epsilon = I_1 (R_1 + r)$$

$$U = IR$$

$$r = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2}$$

$$\epsilon = U_2 + I_2 r = U_1 + I_1 r$$

1. Замените резистор  $R_1$  на резистор  $R_2$  (удобнее просто подселенить второй резистор параллельно первому, так как они одинаковы) и измерьте новую силу тока.

2. Вычислите внутреннее сопротивление источника тока и его ЭДС.  
3. Отключите от источника тока резистор и амперметр. Подключите вольтметр к источнику тока и снимите его показания.  
4. Сделайте вывод, согласуется ли между собой результаты прямых измерений напряжений на выходе источника. Результаты измерений и вычислений занесите в отведенную таблицу. Оцените границы погрешностей измерений.

**Порядок выполнения работы:**

1. Изучите, прочитав инструкцию к лабораторной работе, и составьте электрическую схему.
2. Резисторы извлекаются из магазина сопротивления и подключаются к набору резисторов указанной схемы в различных комбинациях.
3. Для каждого случая из амперметра записываются значения силы тока.
4. Определим внутреннее сопротивление источника и ЭДС источника по формуле:

$$r = \frac{I_2 R_2 - I_1 R_1}{I_1 - I_2}, \quad \epsilon = \frac{I_1 I_2 (R_2 - R_1)}{I_1 - I_2}$$

5. Полученные значения в эксперименте заносим в таблицу.
6. Рассчитаем абсолютную и относительную погрешности для величин, полученной в эксперименте.
7. Результаты, рассчитанные в эксперименте, заносим в таблицу.

1-Таблица

№	$I$ [A]	$R$ [Ω]	$\epsilon$ [В]	$\epsilon$	$\Delta \epsilon_i$	$\overline{\Delta \epsilon}$	$\delta = \frac{\overline{\Delta \epsilon}}{\epsilon} \cdot 100\%$
1							
2							
3							

$\epsilon = \bar{\epsilon} \pm \Delta \bar{\epsilon}$

2-Таблица

№	$I$ [A]	$R$ [Ω]	$r_i$ [Ω]	$\bar{r}$	$\Delta r_i$	$\overline{\Delta r}$	$\delta = \frac{\overline{\Delta r}}{\bar{r}} \cdot 100\%$
1							
2							
3							

$r = \bar{r} \pm \overline{\Delta r}$

Контрольные вопросы

1. Что называется электрической силой источника тока?
2. Чем напряжение отличается от ЭДС?
3. Почему показания вольтметра будут отличаться в тех случаях, когда выключатель подключен и не подключен?
4. Как повысить точность измерения ЭДС источника тока?

ТЕСТЫ ПО ГЛАВЕ II

1. Сколько Ом составит сопротивление медного провода массой 8,9 кг с поперечной сечением  $1 \text{ мм}^2$ ? Плотность меди  $8,9 \text{ г/см}^3$ , удельное сопротивление  $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .  
 А) 8,9    В) 17    С) 34    Д) 44,5
2. Сколько метров стальной рельсов с массой каждого метра 78 кг будет иметь сопротивление  $0,012 \text{ Ом}$ ? Плотность стали  $7,8 \text{ г/см}^3$ , удельное сопротивление  $1,2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .  
 А) 1200    В) 1000    С) 100    Д) 780    Е) 10
3. Если сила тока, проходящего через проводник, линейно возрастала в 10 с 0 до 5 А, то на сколько зарядов (Кл) протекал за это время через поперечное сечение проводника?  
 А) 0,5    В) 2,5    С) 2    Д) 25
4. Найти полное сопротивление (Ом) между точками А и В электрической цепи, выполненной из стали с сечением площадь  $1 \text{ мм}^2$ , прямоугольной формы со сторонами 1 м и 2 м. Удельное сопротивление стали  $1,2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .  
 А) 0,1    В) 0,2    С) 1    Д) 2    Е) 3
5. Каким должно быть сопротивление шунта (Ом), чтобы уменьшить чувствительность гальванометра с внутренним сопротивлением 880 Ом в 11 раз?  
 А) 80    В) 88    С) 440    Д) 1760    Е) 9680
6. Во сколько раз увеличится сопротивление, если удлинить провод в три раза?  
 А) 9    В) 4    С) 2    Д) 3
7. Из одинакового металла были изготовлены две проволоки, равные по массе. Одна из них в 3 раза длиннее другого. Определите отношение сопротивлений этих проводов  $R_1$  и  $R_2$ .

А)  $R_1=3R_2$     В)  $R_2=9R_1$     С)  $R_1=R_2$     Д)  $R_2=3R_1$

8. Сопротивление медного провода длиной 1 км составляет 75,65 Ом. Сколько ньютонов весит проволока? Плотность меди  $8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , удельное сопротивление  $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .  
 А) 225    В) 45    С) 83    Д) 118    Е) 20

9. Провода из цинка и никеля имеют одинаковую массу и сопротивление. Какой провод длиннее и во сколько раз длиннее? Плотность цинка  $7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , удельное сопротивление  $6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , плотность никеля  $8,41 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , удельное сопротивление  $42 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .  
 А) их длина одинакова. Б) цинковая проволока в 8,41 раза длиннее.  
 В) никелевая проволока в 2,9 раза длиннее.  
 С) никелевая проволока в 2,9 раза длиннее.  
 Д) никелевая проволока в 8,41 раза длиннее

10. Через электрическую спираль проходит ток 6 А. Сколько Ампер тока придет через спираль, если отрезать четверть спирали?  
 А) 12    В) 10    С) 4,5    Д) 8    Е) 18

11. Из провода длиной 150 км с поперечным сечением  $150 \text{ мм}^2$ , удельным сопротивлением  $2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$  проведена линия передачи постоянного электрического тока. Сколько Вольт будет падение напряжения на линии, если сила тока равна 100 А?  
 А) 280    В) 5600    С) 2800    Д) 560    Е) 1400

12. Сколько В/м составит напряженность поля в проводнике, если плотность тока, проходящего через алюминиевый проводник, равна  $2 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ ? Удельное сопротивление алюминия  $2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .  
 А)  $10^2$     В)  $4 \cdot 10^3$     С) 0    Д)  $4 \cdot 10^4$     Е)  $4 \cdot 10^2$

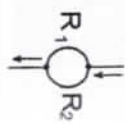
13. К источнику неизменного напряжения последовательно подключались два термистора с равными сопротивлениями. Во сколько раз уменьшилось его сопротивление, если при нагревании одного из термисторов сила тока в цепи увеличилась в 1,5 раза?  
 А) 3    В) 2    С) 1,5    Д) 4,5    Е) 6

14. Сколько лампочек, рассчитанных на напряжение 6,3 В, можно подключить последовательно и подключить к сети напряжением 220 В?  
 А) 8    В) 17    С) 24    Д) 25    Е) 35



15. От последовательно соединенных сопротивлений  $R$  и  $2R$  проходит неизменный ток. Вольтметр при подключении к сопротивлению  $2R$  показал в 1,8 раза большее напряжение, чем при подключении к сопротивлению  $R$ . Во сколько раз сопротивление вольтметра больше сопротивления  $R$ ?
- A) 1,8 B) 8 C) 3,6 D) 16 E) 5,4

16. ABCD ромба изготовлен проволоки. Найти сопротивление между точками  $A$  и  $C$ . Сопротивления сторон  $a$  ромба и диагонали  $AC$  одинаковы и равны  $R$ .
- A)  $5R/11$  B)  $R/2$  C)  $9R/2$  D)  $11R/5$  E)  $9R$



17. Из однородной проволоки с удельным сопротивлением  $\rho$  и поперечной гранью  $S$  изготовляют кольцо радиусом  $r$ , которое соединяют с цепью из двух диаметрально противоположных точек. Определите сопротивление между этими точками.

- A)  $R = \frac{1}{2} \rho \frac{\pi r}{S}$  B)  $R = 2\rho \frac{\pi r}{S}$  C)  $R = \rho \frac{\pi r}{S}$   
 D)  $R = 2\rho \frac{2\pi r}{S}$  E)  $R = \frac{1}{4} \rho \frac{\pi r}{S}$

18. Провод с сопротивлением  $R$  был разрезан на четыре равные части и все четыре части были скручено вместе по длине. Каким будет сопротивление такого провода?

- A)  $R/32$  B)  $R/12$  C)  $R/16$  D)  $R/4$  E)  $R/2$

19. Каким должно быть сопротивление шунта ( $O_m$ ), чтобы уменьшить чувствительность гальванометра с внутренним сопротивлением  $880 \text{ Ом}$  в 11 раз?

- A) 80 B) 88 C) 440 D) 1760 E) 9680

20. Внутреннее сопротивление вольтметра составляет  $2 \text{ кОм}$ , он предназначен для измерения  $10 \text{ В}$ . Какое дополнительное сопротивление ( $KO_m$ ) подключается к этому вольтметру, с помощью которого можно будет измерить напряжение  $100 \text{ В}$ ?

- A) 0,2 B) 5 C) 12 D) 18 E) 20

21. Какое сопротивление ( $O_m$ ) подключить к вольтметру, предназначенному для измерения напряжения  $20 \text{ В}$ , для измерения напряжения  $160 \text{ В}$ ? Внутреннее сопротивление вольтметра равно  $400 \text{ Ом}$ .

- A) 2400 B) 2500 C) 2600 D) 2700 E) 2800

22. Сопротивления  $R$  и  $2R$  соединены параллельно источнику постоянного. Сколько теплоты выделяется в сопротивлении  $2R$  ( $Дж$ ), когда в сопротивлении  $R$  выделяется  $100 \text{ Дж}$  теплоты?

- A) 400 B) 200 C) 100 D) 50 E) 25

23. При какой силе тока в ( $I$ ) на участке цепи с сопротивлением  $2 \text{ Ом}$  за  $3 \text{ с}$  выделяется  $54 \text{ Дж}$  тепла?

- A) 18 B) 9 C) 3 D) 6 E) 11

24. Сколько Джоулей тепла выделяется при прохождении заряда  $12 \text{ Кл}$  через неподвижный проводник с напряжением на концах  $3 \text{ В}$ ?

- A) 0,25 B) 2 C) 4 D) 36 E) 108

25. Пусть комната будет освещена 5 лампами, подключенными последовательно. Как изменится расход электроэнергии, если лампы увеличить на одну?

- A) не изменится B) уменьшается в) увеличивается  
 Г) может как увеличиваться, так и уменьшаться е) НПО

26. Резисторы с сопротивлениями  $150 \text{ Ом}$  и  $90 \text{ Ом}$  подключаются к источнику тока последовательно. Сколько  $кДж$  тепла выделяется на первом резисторе, когда на втором резисторе выделяется  $18 \text{ кДж}$  тепла?

- A) 10 B) 20 C) 30 D) 90 E) 150

27. Электрический чайник имеет два нагревательных элемента. Если к сети подключен первый элемент, вода закипит через 1 час. Если второй подключен, вода закипит через 0,5 часа. Через сколько минут закипит вода, если оба элемента соединить одновременно (параллельно)?

- A) 15 B) 20 C) 25 D) 30 E) 28

28. Электрическая цепь состоит из резистора с сопротивлением  $2 \text{ Ом}$  и источника тока ЭДС  $6 \text{ В}$  с внутренним сопротивлением  $1 \text{ Ом}$ . Сколько Ампер силы тока в цепи?

- A) 18 B) 6 C) 3 D) 2 E) 1

29. Если соединить зажимы аккумулятора емкостью  $3 \text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $0,6 \text{ Ом}$  с металлическим проводником, сопротивление которого очень мало, то какой будет сила тока в нем ( $I$ )?

- A) 5 B) 1,8 C) 0,6 D) 0,3 E) 0,2

30. ЭДС источника тока  $9 \text{ В}$ , внутреннее сопротивление  $0,5 \text{ Ом}$ . Каково значение напряжения на резисторе с сопротивлением  $4 \text{ Ом}$ , подключенном к тому же источнику?

- A) 1 B) 4,5 C) 9 D) 8,5 E) 8

31. Сопротивление реостата, подключенного к источнику тока, равно внутреннему сопротивлению источника. Во сколько раз при уменьшении сопротивления реостата напряжение на нем уменьшается в 2,5 раза?
- A) 4 B) 3 C) 2,5 D) 2 E) 1,5

### ЗАДАНИЯ ПО ГЛАВЕ II

1. Анодное напряжение на диоде равно 200 В. Сколько электронов достигает анода, когда электрическое поле выполняет работу 1,6 Дж?  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  С.
2. Скорость электрона в электрическом поле увеличилась с  $1 \cdot 10^7$  м/с до  $5 \cdot 10^7$  м/с. Каково разность потенциалов между начальной и конечной точками (кВ)? Отношение заряда электрона к массе равно  $1,76 \cdot 10^{11}$  Кл/кг.
3. Электрон, перемещаясь между двумя точками в электрическом поле, имел скорость  $v = 3 \cdot 10^7$  м/с. Какова разность потенциалов между этими двумя точками (В)? Заряд электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, масса  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг. Начальная скорость электрона равна нулю.
4. Плотность тока, проходящего через медный провод, равна  $1 \text{ А/мм}^2$ . Каково напряжение электрического поля в проводе (В/м)? Удельное сопротивление меди  $1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.
5. В электролитической ванне с сульфатом цинка сила тока изменяется по линейному закону  $I = (2 + 0,02t)$  А. Определите электрический заряд, прошедший через электролит в течение 5 мин (Кл).
6. Электродвигатель-стартер автомобиля работал 5 с на токе 180 А от аккумуляторной батареи. После того, как автомобиль проехал, генератор начал заряжать аккумулятор током 5 А. Через сколько минут восстановится прежнее состояние батареи?
7. Сколько электронов протекает за 1 мс через поперечную поверхность поперечного сечения проводника, когда сила тока, проходящего через проводник, равна  $1,6 \text{ мкА}$ ? Заряд электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.
8. К источнику неизменного напряжения последовательно подключались два термистора с равными сопротивлениями. Во сколько раз уменьшилось его сопротивление, если при нагревании одного из термисторов сила тока в цепи увеличилась в 1,5 раза?
9. Провод с сопротивлением  $R$  был разрезан на четыре равные части и все четыре части были скручены вместе по длине. Каким будет сопротивление такого провода?

10. Во сколько раз уменьшается сила тока в проводнике  $K$ , если проводник с сопротивлением  $2R$  подключен параллельно к проводнику с сопротивлением  $K$ , подключенному к источнику постоянного напряжения?

11. Внутреннее сопротивление амперметра составляет 9,9 Ом, он предназначен для измерения тока до 0,1 А. Чтобы измерить ток до 10 А одним и тем же амперметром, нужно подключить к нему шунт на сколько Ом?
12. Если к амперметру подключить один из двух одинаковых шунтов, то показания увеличатся в 2 раза. Во сколько раз увеличится его показания, если два шунта соединить параллельно амперметру?
13. Внутреннее сопротивление вольтметра 2 кОм, оно предназначено для измерения 10 В. Какое дополнительное сопротивление (кОм) подключается к этому вольтметру, с помощью которого можно будет измерить напряжение 100 В?
14. Электрический чайник имеет два нагревательных элемента. Если к сети подключен первый элемент, вода закипит через 1 час. Если подключен второй элемент, вода закипит через 0,5 часа. Через сколько минут закипит вода, если оба элемента соединить одновременно (параллельно)?
15. Сопротивление реостата, подключенного к аккумулятору, равно внутреннему сопротивлению аккумулятора. Во сколько раз уменьшается напряжение на нем, если сопротивление реостата уменьшается в 2 раза?
16. Сколько ампер силы тока, проходящего через нагреватель с сопротивлением 330 Ом, тает 1 г лед температурой  $0^\circ\text{C}$  при 1 с? Удельная теплота плавления льда  $3,3 \cdot 10^5$  Дж/кг.
17. При подключении к гальваническому элементу вольтметра показывал 1,2 В, а при подключении элемента к проводу с сопротивлением 2 Ом вольтметр показывал 1 В. Найти внутреннее сопротивление элемента.
18. Определить ток короткого замыкания аккумулятора батареи, если ток в цепи 5 А при подключении сопротивления 2 Ом к батарее емкостью 12 В.
19. Сколько аккумуляторов нужно подключить последовательно от ЭДС 110 В и от ЭДС 2 В с внутренним сопротивлением 0,2 Ом, чтобы генерировать ток 5 А при разности потенциалов на полюсах аккумулятора?
20. Два элемента с ЭДС 1,9 В и 1,1 В, внутренними сопротивлениями 0,8 Ом и 0,1 Ом, соединены параллельно и подключены к внешнему сопротивлению 10 Ом. Определите силу тока на внешней части цепи.

21. К амперметру с сопротивлением  $0,16 \text{ Ом}$  подключается шунт с сопротивлением  $0,04 \text{ Ом}$ . Амперметр показывает  $8 \text{ А}$ . Определите силу тока в проводнике.

22. Амперметр с сопротивлением  $0,4 \text{ Ом}$  предназначен для измерения силы тока  $5 \text{ А}$ . Чтобы измерить силу тока  $100 \text{ А}$  с помощью того же амперметра, какой шунт подключить к нему?

23. Какое дополнительное сопротивление подключить к вольтметру, чтобы показание вольтметра с сопротивлением  $200 \text{ Ом}$  увеличилось в  $20$  раз?

24. Две электрические лампы мощностью  $60 \text{ Вт}$  и  $90 \text{ Вт}$  рассчитаны на напряжение  $127 \text{ В}$ . Сопротивление какого из них велико и во сколько раз больше?

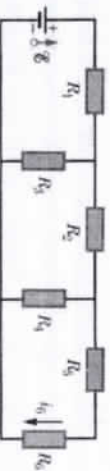
25. Дифт массой  $900 \text{ кг}$  поднимается со средней скоростью  $0,44 \text{ м/с}$ . Напряжение на зажимах мотора  $220 \text{ В}$ , его КПД  $90\%$ . Определите мощность и силу тока, потребляемую двигателем.

26. Электрообогреватель мощностью  $600 \text{ Вт}$  рассчитан на напряжение  $120 \text{ В}$ . Какую длину следует брать такую проволоку, если поверхность поперечного сечения никелевой проволоки, из которой изготовлен нагреватель, равна  $0,2 \text{ мм}^2$ ? Удельное сопротивление для никеля  $4 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

27. Определить наибольшую мощность в цепи аккумулятора, если ток короткого замыкания аккумулятора ЭДС  $12 \text{ В}$  равен  $5 \text{ А}$ .

28. С какой мощностью загорается каждая из ламп, если к ним последовательно подключить лампы мощностью  $100 \text{ Вт}$  и  $200 \text{ Вт}$ , а затем подключить их к квартирной сети  $220 \text{ В}$ ?

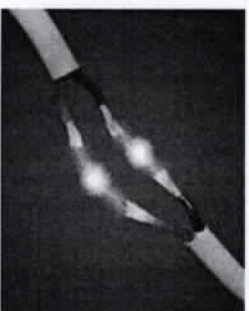
29. На рисунке  $R_6$  сопротивление на резисторе равно  $i_6 = 1,4 \text{ А}$ , а сопротивления  $R_1 = R_2 = R_3 = 2 \text{ Ом}$ , и  $R_4 = 16 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = 8 \text{ Ом}$ . Чему равен ЭДС идеальной батареи?



30. Чему равно электрическое сопротивление лампы накаливания мощностью  $75 \text{ Вт}$ , выставленной для освещения квартиры в рабочем состоянии? А электрическое сопротивление лампы с мощностью  $150 \text{ Вт}$ ?

## ГЛАВА III. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

В предыдущей главе мы познакомились с тем, только с электрическим током в металлах. Мы увидели, что в металлах носителями заряда являются только свободные электроны. А в этой главе мы познакомимся с тем, за счет чего возникает электрический ток в неметаллических средах или вообще в безмет. вакууме. В частности, мы познакомимся с темами электрический ток в жидкостях, электрический ток в полупроводниках, электрический ток в газах и электрический ток в вакууме. Кроме того, мы познакомимся с полупроводниками и их различными свойствами и их ролью в технике.



### § 18. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЖИДКОСТЯХ. ЗАКОНЫ ФАРАДЕЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЛИЗА.

#### Истечение электролита:

Жидкость, состоящая из положительных ионов, называется электролитом. Другими словами, растворы с ионной проводимостью называются электролитами. Электрод, подключенный к (+) полюсу источника, называется анодом (А), а электрод, подключенный к (-) полюсу, называется катодом (К). При прохождении тока через раствор растворимые вещества (соль, щелочь, кислота и др.) процесс диссоциации молекул воды на положительные и отрицательные ионы называется электролитической диссоциацией. Процесс, обратный электролитической диссоциации (превращение положительных и отрицательных ионов в нейтральную молекулу путем присоединения), называется рекомбинацией. Ионы, движущиеся к аноду, называются анионами. Анионы-это отрицательно заряженные ионы. Ионы, движущиеся к катоду, называются катионами. Катоды-это положительно заряженные ионы. В жидкостях электрический ток состоит из упорядоченного движения равного количества положительных и отрицательных ионов в противоположных направлениях. Например, сульфат меди ( $\text{CuSO}_4$ ) при растворении в воде диссоциирует на положительные ( $\text{Cu}^{2+}$ ) и ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) отрицательные ионы, то есть происходит электролитическая диссоциация. При подключении раствора к источнику тока ион  $\text{Cu}^{2+}$  движется к пластине (катоде), связанной с отрицательным полюсом, и прилипает к ней, в то время как ион  $\text{SO}_4^{2-}$  движется к пластине

(аноду), связанной с отрицательным полюсом. Пластины называются электродами. Явление диссоциации вещества на электродах при прохождении тока через электролит называется электролизом.

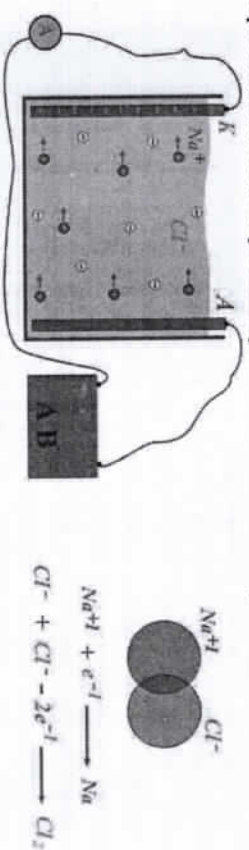


Рисунок 18.1

При подключении кристалла поваренной соли (NaCl) к току через амперметр амперметр показывает ноль. Даже при подключении к току через амперметр, опустив в чистую дистиллированную воду, амперметр покажет ноль. Теперь, когда мы растворяем кристалл поваренной соли в воде, амперметр показывает, что ток проходит. При этом молекула поваренной соли диссоциирует на ионы  $Na^+$  и  $Cl^-$  под действием электрического поля, т. е. электролитическая диссоциация- происходит. Ион  $Na^+$  движется к катоду как катод. Достигнув катода, он превращается в нейтральный атом Na, притягивая к себе один недостающий электрон с катода. Ион  $Cl^-$  движется к аноду в виде аннона. Достигнув анода, он превращается в нейтральный атом  $Cl$ , отдавая аноду лишний один электрон, и сразу два нейтральных атома  $Cl$  объединяются, образуя молекулу  $Cl_2$ . Эта молекула вылетает как газ (рис.18.1).

**Законы электролиза Фарадея:**

В 1833 году английский физик М.Фарадей на основании результатов опытов открыл два закона электролиза. Эти законы позже стали называться законами Фарадея по его имени.

*1-й закон Фарадея: масса вещества, выделяющегося на электродах при электролизе, прямо пропорциональна количеству заряда, прошедшего через электролит.*

Математическое выражение 1-го закона Фарадея:

$$m = k q \quad (18.1)$$

Здесь:  $m$  – масса, выделившегося на электроде,  
 $q$  – количество заряда, прошедшего через электролит,  
 $k$  – коэффициент пропорциональности, величина, зависящая не только от формы электродов, но и от расстояния между электродами, силы тока и

Итальянский физик-экспериментатор и химик Мик-Фарадей родился 1791 сентября 22 года в Лиджи в городке Ньютон-Линге близ Лондона в семье кузнеца. Он был членом Лондонского Королевского общества и многих научных учреждений, а также иностранным почетным членом Пембербургской академии наук. Фарадей создал первую модель электролиза, открыл закон электролитической индукции – закон, лежащий в основе производства всех электрических приборов современной жизни. Он был первым, кто сделал первичный аккумулятор, химическое объяснение тока, законы электролиза, влияние магнитного поля на свет, оптический эффект в анилине и др. Фарадей внес в науку такие термины, как ион, катод, анод, электролит, диэлектрик, диамagnetизм, намагнетизм. Он был основоположителем теории электромагнитного поля, которую затем обобщил Максвелл. Фарадей умер 1867 августа 25 года в Миддлсексе. Преподобитель, во дворец Хэмптон-корт.



Майкл Фарадей (1791–1867)

температуры, а также от вида вещества, называется электрохимическим эквивалентом вещества.

Электрохимический эквивалент вещества – показывает, сколько массы выделяется на электроде при прохождении заряда  $I$  Кл через электролит.

$$k = \frac{m}{q} \quad (18.2)$$

Электрохимический эквивалент вещества измеряется в кг/Кл.

Первый закон Фарадея также можно записать в следующем виде, используя формулу  $q=It$

$$m = k I t \quad (18.3)$$

Основываясь на приведенной выше формуле, первый закон Фарадея также может быть определен следующим образом:

Масса вещества, выделяющегося на электродах при электролизе, прямо пропорциональна силе тока и времени прохождения тока.

*2-й закон Фарадея: электрохимический эквивалент вещества прямо пропорционален их химическому эквиваленту.*

Математическое выражение 2-го закона Фарадея:

$$k = \frac{1}{F} \frac{M}{n} \quad (18.4)$$

Здесь:  $F = e N_A = 96500$  [Ку/моль] – постоянная Фарадея, обозначающая количество заряда, прошедшее при диссоциации одного моля вещества.

$M$  – молярная масса атома диссоциированного вещества на электроде,  
 $n$  – валентность диссоциированного вещества на электроде.

Объединив два закона Фарадея, можно записать следующую формулу для массы, выделившегося на электроде

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} I t \quad (18.5)$$

Значения электрохимических эквивалентов различных веществ различны, и их значения приведены в приложении.

Сила тока, проходящего через электролит, прямо пропорциональна напряжению источника, концентрации раствора (количеству растворенной соли, щелочи, кислоты), активной поверхности электродов, обратно пропорциональна расстоянию между электродами и равна:

$$I \sim U, \quad I \sim n, \quad I \sim S, \quad I \sim t, \quad I \sim 1/d \quad (18.6)$$

С повышением температуры в интервале температур замерзания и кипения раствора сопротивление электролита уменьшается, а проводимость увеличивается.

В электролитах электрический ток создается движением равного количества отрицательных и положительных ионов.

$$I_{\text{общ}} = I_{(+)} + I_{(-)} = 2I_{(+)} = 2I_{(-)} \quad (18.7)$$

#### Применение электролиза в технике:

Покрытие поверхности металлических предметов гладким тонким слоем другого металла с помощью электролиза называется гальваностецией. Для защиты металлов от коррозии и различных видов коррозии или для украшения их поверхности применяют никель, хром, золото и серебро.

Электролиз, при котором для восстановления формы изделия на его поверхности образуется слой металла толщиной в несколько миллиметров, называется гальванопластикой. Этот метод используется для копирования предметов, монет и медалей. Для этого сначала берется копия предмета из пластичного материала (например, воска). Затем поверхность этой копии покрывается тонким веществом, которое проводит электрический ток, и помещается в электролитическую ванну в качестве катода. Когда ток проходит через ванну, копия покрывается толстым слоем металла. Методом гальванопластики изготавливают точную копию драгоценных украшений, найденных при археологических раскопках, штампы для изготовления грампластинок и др.

Получение химически чистого металла электролизом называется рафинированием металлов. Этот вид электролиза используется для извлечения чистой меди, чистого золота и других чистых металлов из состава природных руд. Например, металлургическая медь, полученная из плавильной печи, обычно содержит различные примеси. Для очистки меди от других веществ огромные листы (листы) металлургической меди опускают в раствор медного купороса и соединяют с положительным полюсом источника тока. В качестве катода берется тонкий лист чистой меди.

При электролизе металл, служащий анодом, много плавится в местах с высокой плотностью тока. Из-за сильного электрического поля в

высоких участках гладкой поверхности металла плотность тока, выходящего из этого места, также велика. Поэтому выпуклые участки быстро сглаживаются. Такое применение электролиза называется электролитическим измельчением.

Мышление электролиза также используется в электрометаллургии. При этом из растворенных руд извлекают алюминий, натрий, магний, бериллий и другие металлы. Между дном ванны и угловыми электродами зажатается электрическая дуга. При этом температура повышается до 2500 К. В дуговом пламени происходит растворение руды и электролитическая диссоциация молекул. При пропускании электрического тока через диссоциированную расплавленную руду молекулы металла опускаются на дно ванны. Расплавленный металл стекает по наклонному дну ванны в специальные ванны.

Источником водорода, имеющий атомную массу 2 на атома водорода, является дейтерием ( $D$ ). При соединении этого изотопа с кислородом получается тяжелая вода ( $D_2O$ ). Природная вода будет содержать тяжелую воду, даже в очень небольших количествах. Получается, что с помощью электролиза из состава воды можно выделить тяжелую воду. Поскольку тяжелая молекула воды тяжелее обычной воды, ее подвижность в процессе электролиза низка. Поэтому в газах, выделяющихся при электролизе, остаются молекулы легкого водорода или простой воды, а в электролите остается концентрация тяжелой воды. В результате электролиза получается вода с высокой концентрацией  $D_2O$ . Это называется поглощением тяжелой воды.

#### Вопросы по теме:

1. Что называется электролизом?
2. Что называется анодом и катодом?
3. Дать определение понятиям электролит, электрод.
4. Как образуется электрический ток в жидкостях? Что означает электрохимический эквивалент?
5. Опишите законы Фарадея. Что означает число Фарадея?
6. От чего зависит сила тока в процессе электролиза?
7. Опишите применение электролиза в технике.

#### Решение задач:

1. При электролизе через сечение за 1 сек положительные ионы перенесли заряд 1,5 Кл, отрицательные ионы 2,5 Кл. Какова сила тока во внешней цепи (A)?

- A) 3,5      B) 4      C) 1      D) 1,5      E) 2,5

Дано:	Решение:
$t=1\text{с}, q_1=1,5\text{С}$	$I = \frac{q_1+q_2}{t} = 4\text{А}$
$q_2=2,5\text{С}$	$I = 4\text{А}$
$I=?$	

Ответ: В) 4.

2. Через ванну, заполненную раствором  $\text{AgNO}_3$ , проходим ток 10 мА. Сколько атомов серебра распадается на катоде за 1 с?

Дано:	Решение:
$I=0,01\text{А}$	$\text{AgNO}_3$ молярная масса $M_r = 62 \cdot 10^{-3}\text{кг/мол}$
$t=1\text{с}, n=1$	$m=kl = \frac{1}{F \cdot n} It = \frac{1}{96500} \frac{1}{1} \frac{62 \cdot 10^{-3}}{1} 10^{-2} = 6,25 \cdot 10^{-9}\text{кг}$
$m=?$	$m=6,25 \cdot 10^{-9}\text{кг}$

Теперь давайте определим атомы серебра.

$$N = \frac{m}{M_r} N_A = \frac{6,25 \cdot 10^{-9}\text{кг}}{62 \cdot 10^{-3}\text{кг/мол}} \cdot 6 \cdot 10^{23}\text{мол}^{-1} = 6 \cdot 10^{17}$$

Ответ:  $6 \cdot 10^{17}$

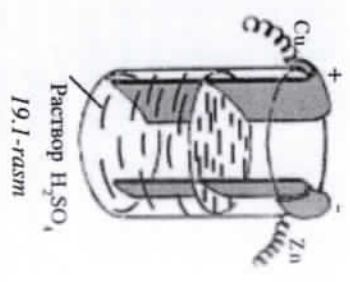
### § 19. ГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ. ЭЛЕМЕНТ ДАНИЕЛЯ. АККУМУЛЯТОРЫ.

Прежде чем начать говорить о современных аккумуляторах, давайте взглянем на историю их появления. Познакомимся с гальваническим элементом и элементом Даниэля, одним из первых созданных источников постоянного тока.

#### Гальванический элемент:

Первым генератором ЭДС, открывшим возможность изучения электрического тока и его практического использования (после, конечно, электрофорной машины), считается гальванический элемент. Энергия, затрачиваемая в электрической цепи, пополняется за счет энергии, выделяемой химическими процессами, протекающими в гальваническом элементе. Впервые такой химический элемент был изобретен в 1799 году итальянский физик А. Вольта. Вольта на основе опытов установил, что

различные проводники (например, два разных металла) взаимно заряжаются при соприкосновении: на границе соприкосновения проводников в одном из металлов накапливаются отрицательные заряды (присутствуют лишние



электроны), а в другом-положительные (отсутствуют электроны). Разделение зарядов в области контакта металлов означает о том, что произошел ЭДС. Рождается идея соорудить источник тока с помощью такого процесса. Наиболее исследования Вольты дали толчок эксперимента Гальвани. Поэтому источник тока был назван в его честь гальваническим элементом.

Вольта в своих опытах обнаружил, что получить гальванический элемент, построив замкнутую цепь только из однородных проводников, в которых при прохождении тока не происходит никаких химических изменений.

Но бывает и другая ситуация, когда хотя бы часть цепи состоит из проводника второго рода. При прохождении тока через этот проводник второго рода химические изменения в его структуре могут инициировать ряд химических превращений, в результате которых происходит уменьшение внутренней (химической) энергии тел, составляющих цепь, и за счет этой энергии становится возможным поддержание электрического тока в цепи. Рассмотрим такие процессы, например, на примере гальванического элемента, называемого вольтовым элементом.

В элементе Вольты медные и цинковые пластины (электроды) опускают в водный раствор  $\text{H}_2\text{O}$  серной кислоты  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (рис.19.1).

Когда электроды соединены между собой проводником, в получившейся замкнутой цепи возникает электрический ток. Хотя ЭДС элемента в начале работы  $I, V$ , но при использовании элемента ЭДС почему-то быстро уменьшается. Поэтому на практике, в отличие от вольтового элемента, проводники первого и второго рода используют другой выбранный элемент, например, элемент Даниэля

#### Элемент Даниэля:

Элемент был изобретен английским ученым и изобретателем Дж. Даниэлем в 1836 году и считается первой устойчивой неизменной источником тока. В этом элементе анодом служит медный электрод, погруженный в раствор купороса меди  $\text{CuSO}_4$ , а катодом-цинковый электрод, погруженный в раствор купороса цинка  $\text{ZnSO}_4$ . Чтобы растворы не смешивались друг с другом слишком быстро, их отделяют барьером из лагуранную глиняную пору. Такое строение элемента обеспечивает его равномерную работу в течение длительного времени. ЭДС элемента Даниэля равен 1,09 В.

Теперь рассмотрим, как в гальваническом элементе возникает ЭДС и электрический ток. Опыты показывают, когда гальванический элемент работает в течение длительного периода времени, один из электродов постепенно расходуется (плавится). Из этого можно сделать вывод, что

образование гальванического элемента ЭДС связано с плавлением металла. Но при этом в раствор переходят не нейтральные атомы металла, а его положительные ионы, а лишние электроны, оставаясь в металле, заряжают его отрицательно (рис.19.2). (Способность металлов переходить в раствор в ионном состоянии называется электролитической эластичностью металла или кратко эластичностью плавления.) Но этот процесс быстро прекращается, так как при увеличении концентрации положительных ионов в растворе ионы, окружающие металл, за счет теплового движения попадают на электрод, нейтрализуются находящимися в нем лишними электронами и диссоциируют на поверхности электрода. Быстро устанавливается равновесие: число ионов, переходящих в раствор за определенный промежуток времени, равно числу ионов, сидящих за это время от раствора к электроду. Этому равновесному состоянию соответствует определенная разность потенциалов между металлом и раствором, которая зависит только от природы растворителя с металлом и концентрации раствора.

Следует отметить, что все металлы, которые находятся в контакте с электролитом, заряжены отрицательно, а электродит заряжен положительно. Рассмотрим на примере элемента Даниэля, как происходит движение зарядов в замкнутом цепи гальванического элемента и как это движение поддерживается. Для этой цели используем схематическое изображение элемента Даниэля (рис.19.3). Из рисунка видно, что в правой камере цинковый электрод опускают в раствор соли  $ZnSO_4$ , а в левой камере медный электрод опускают в раствор соли  $CuSO_4$ , камеры отделяют пористым барьером. При разомкнутом элементе (когда электроды не соединены между собой) между каждым электродом и прилегающим к нему электролитом устанавливается равновесное состояние, при котором, как было отмечено выше, возникает соответствующая этому состоянию разность потенциалов.

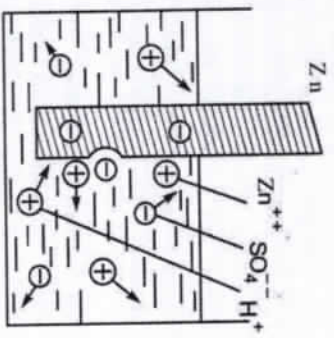


Рисунок 19.2

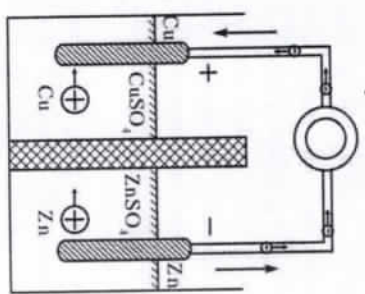


Рисунок 19.3

Теперь соединим медный и цинковый электроды между собой проводящим инструментом (см. рис.19.3). Эластичность плавления цинка больше, чем у меди, поэтому цинковая пластина заряжена более отрицательно, чем медная пластина. В результате возникает разность потенциалов между медными и цинковыми электродами. Поэтому во внешней цепи электроды начинают течь от цинкового электрода с низким потенциалом к медному электроду с высоким потенциалом. Это приводит к нарушению равновесия в обеих камерах. Из-за ухода электронов количество отрицательного заряда на цинковом электроде уменьшается, и наоборот, из-за прихода электронов отрицательные заряды увеличиваются на медном электроде. Цинк стремится восстановить равновесие, выделяя в раствор положительные ионы в правой камере цинк начинает плавиться. В раствор положительных ионов переходит ионы цинка  $Zn^{++}$ , при этом электроны остаются в нем для выполнения уменьшающегося заряда электрода. В левой камере, наоборот, ионы меди  $Cu^{++}$  поступают на медный электрод, соединяются с находящимися в нем избыточными электронами и оседают на электроде в виде нейтрального атома. Таким образом, плавление цинкового электрода и окисление атомов меди на медном электроде поддерживают разность потенциалов между этими электродами постоянной, и в цепи в течение длительного времени протекает постоянный ток.

Из этого описанного процесса видно, что в правой камере накапливается избыток ионов цинка, а в левой — избыток ионов кислородного остатка  $SO_4^{--}$ . Но через пористый барьер ионы  $SO_4^{--}$  просачиваются в правую камеру и, соединившись с ионами  $Zn^{++}$ , образуют соль сульфата цинка  $ZnSO_4$ :

$$Zn^{++} + SO_4^{--} \rightarrow ZnSO_4$$

В результате в правой камере увеличивается  $ZnSO_4$ , а в левой  $CuSO_4$ . Если элемент будет долго работать в таких условиях, то в правой камере концентрация  $ZnSO_4$  возрастет до состояния насыщения и кристаллы  $ZnSO_4$  начнут опускаться из раствора на дно, а в левой камере концентрация  $CuSO_4$  может сильно снизиться и, как следствие, ЭДС элемента снизится до нуля. Поэтому для того, чтобы такого не произошло и чтобы элемент функционировал длительное время, в раствор вводят резерв  $CuSO_4$ .

Так, во внешней цепи гальванического элемента (в проводнике) электроды движутся от цинкового электрода к медному электроду, в электролите отрицательные ионы ( $SO_4^{--}$  — анионы) движутся от медного электрода к цинковому электроду, положительные ионы ( $Cu^{++}$  и  $Zn^{++}$  — катионы) движутся от цинкового электрода к медному электроду, и по всей цепи поддерживается непрерывная превращения зарядов. Этот поток зарядов создает общий ток, протекающий по всей цепи.

В других гальванических элементах процессы образования ЭДС и тока в основном происходят так же, как и в элементе Даниэля.

Аккумуляторы:

Оказывается, вредное для гальванических элементов явление поляризации, можно использовать целесообразно (по назначению). В 1860 году французский физик Г. Плант показал, что поляризация может генерировать электрический ток на практике с помощью ЭДС. Он изготовил элемент с двумя свинцовыми электродами, погруженными в раствор серной кислоты  $H_2SO_4$ . Очевидно, что в этом случае элемент не будет иметь ЭДС, поскольку оба электрода сделаны из одного и того же металла. Но если от такого элемента в течение некоторого времени пропустить постоянный ток от внешнего источника, то на электродах будут выделяться продукты электролиза, вступающие в реакцию с электролитным веществом. Из-за этого электроды становятся разными по химическому составу, и получается ток, равный примерно 2В. При этом сам элемент может стать источником тока, а при подключении к внешней цепи в течение некоторого времени будет протекать электрический ток.

Таким образом, оказывается, что для возникновения ЭДС в элементе Планте необходимо провести через него ток от источника постоянного тока. Этот процесс называется зарядкой элемента.

Элемент Планте, использующий явление поляризации, и подобные ему называются вторичными элементами, или аккумуляторами, потому что они обладают способностью накапливать (накапливать) энергию.

Следовательно, аккумуляторы-это устройства, способные накапливать электричество. Однако для того, чтобы аккумулятор имел практическое значение, необходимо, чтобы он удовлетворял двум условиям: 1) чтобы поляризация электродов была стабильной, и 2) чтобы процесс, происходящие в аккумуляторе, были обратимыми. Первое условие необходимо для того, чтобы аккумулятор не разряжался сам по себе, когда он не используется. Второе условие необходимо для того, чтобы не было изменений, которые могут сделать аккумулятор непригодным для дальнейшей эксплуатации.

Рассмотрим, какие процессы происходят при зарядке элемента Планте. Как уже отмечалось, элемент Планк состоит из двух свинцовых пластин, погруженных в раствор серной кислоты. Пластины реагируют с серной кислотой, покрывая поверхность слоем сульфата свинца  $PbSO_4$ . При прохождении через аккумулятор электрического тока от внешнего источника (при зарядке аккумулятора) отрицательные ионы начинают двигаться в сторону анода и выделяют следующим образом



вступая в реакцию,  $PbSO_4$  превращает сульфат свинца в перекись свинца  $PbO_2$ .  $H^+$  положительные ионы начинают двигаться в сторону катода, и



вступая в реакцию,  $PbSO_4$  превращает сульфат свинца в металл  $Pb$ . Таким образом, при зарядке аккумулятора возникает резкая несимметричность электродов: один из электродов остается свинцовым, а другой-свинцово-перекисным. Аккумулятор был заряжен, теперь его можно использовать в качестве источника тока.

При поступлении тока во внешнюю цепь аккумулятор разряжается: токи не идут в обратном порядке. По окончании разрядки обе пластины выравниваются слоем перекиси свинца одинаковой толщины.

(После того, как энергия аккумулятора закончится, из него можно будет провести зарядку током и повторить этот процесс много раз. Наибольшее количество электричества, которое можно получить от заряженного аккумулятора, называется емкостью аккумулятора. Эта величина измеряется в амперных-часах. Чем больше поверхность пластин аккумулятора, тем больше на них продуктов электролиза, а значит, чем больше емкость аккумулятора при разряде. Поэтому пластинам аккумулятора придается особая форма, увеличивающая их поверхность.

На практике наряду со свинцовыми (кислотными) аккумуляторами широко применяются и железноникелевые (щелочные). Аккумуляторы играют важную роль в современной электротехнике.

Вопросы по теме:

1. Как устроен элемент Гальвани? Расскажите, как это работает.
2. Как устроен элемент Даниэля? Расскажите, как это работает.
3. Как работает элемент Вольта.
4. Что понимается под поляризацией электродов? В чем его вред и польза?
5. Что за прибор аккумулятор? Как происходит зарядка и разрядка аккумулятора?
6. Где используются аккумуляторы?

## § 20. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Элементы, называемые полупроводниками Таблицы Д.И. Менделеева входят из 12 химических элементов, образующих компактную группу, в которую, кроме того, входят многие неорганические и органические соединения. В физике есть раздел, посвященный только полупроводникам, который называется физикой полупроводников. Успехи современной физики немалыми без физики полупроводников.

Собственная проводимость:

В периодической системе Менделеева химических элементов есть такие элементы, как германий ( $Ge$ ), кремний ( $Si$ ), Индий ( $In$ ), галлий ( $Ga$ ), мышьяк ( $As$ ), фосфор ( $P$ ), сурьма ( $Sb$ ), которые по своим электрическим свойствам



стоят между проводниками и диэлектриками. Эти элементы ведут себя как диэлектрики при очень низких температурах. По мере повышения температуры свойство проводника тока также становится все более похожим на проводники. Поэтому эти элементы также называют полупроводниками и соответствуют с их электрическими свойствами.

При повышении температуры, некоторая часть валентных электронов может получить энергию, достаточную для разрыва ковалентных связей. Тогда в кристалле возникнут свободные электроны (электроны проводимости). Одновременно в местах разрыва связей образуются вакансии, которые получили название «дырки». Вакантное место может быть занято валентным электроном из соседней пары, тогда дырка переместится на новое место в кристалле. При заданной температуре полупроводника в единицу времени образуется определенное количество электронно-дырочных пар. В то же время идет обратный процесс — рекомбинация (при встрече свободного электрона с дыркой, восстанавливается электронная связь). Электронно-дырочные пары могут рождаться также при освещении полупроводника за счет энергии электромагнитного излучения. В отсутствие электрического поля электроны проводимости и дырки участвуют в хаотическом тепловом движении.

Если полупроводник помещается в электрическое поле, то в упорядоченное движение вовлекаются не только свободные электроны, но и дырки, которые ведут себя как положительно заряженные частицы. Поэтому ток  $I$  в полупроводнике складывается из электронного  $I_n$  и дырочного  $I_p$  токов:  $I = I_n + I_p$ .

Концентрация электронов проводимости в полупроводнике равна концентрации дырок:  $n_p = n_n$ , электронно-дырочный механизм проводимости проявляется только у чистых (без примесей) полупроводников и называется *собственной электрической проводимостью* полупроводников.

Давайте проверим электрические свойства одного из собственных полупроводников — германия (Ge) или кремния (Si), который находится в группе IV, например, германия. Этот элемент, находящийся в ячейке 32 периодической системы, имеет 32 электрона, из которых 28 находятся во внутренних электронных оболочках и 4-во внешней оболочке. Поэтому германий занимает в периодической системе место в IV группе. Другими словами, его валентность равна 4, он может образовывать связи с соседними атомами через 4 внешних электрона. В чистом германии каждый атом образует ковалентную связь (двойную связь) с 4 атомами германия вокруг него через валентные электроны. При очень низких температурах чистый полупроводник вообще не проводит ток. Поскольку у него нет свободных

электронов, несущих ток, 4 валентных электрона также твердо расположены на своем месте. По мере повышения температуры электрическое возмущение чистых полупроводников, в отличие от проводников, увеличивается, а проводимость уменьшается, то есть сила тока, проходящего через него, увеличивается. Потому что, поскольку валентные электроны в ковалентной связи слабо связаны с ядром, под воздействием тепла эти электроны отрываются от ядра и превращаются в свободные электроны. Эти свободные электроны ведут себя хаотично и хаотично по всей кристаллической решетке. Из-за того, что электрон остается на месте, возникает электронный дефект. Мы называем это пустое, вакантное место дыркой. Дырки имеют заряд  $+e$ . Если на чистый полупроводник воздействовать электрическим полем, электроны (+) начнут двигаться в сторону плюса, а ямки (-) — в сторону минуса (рис. 20.1).

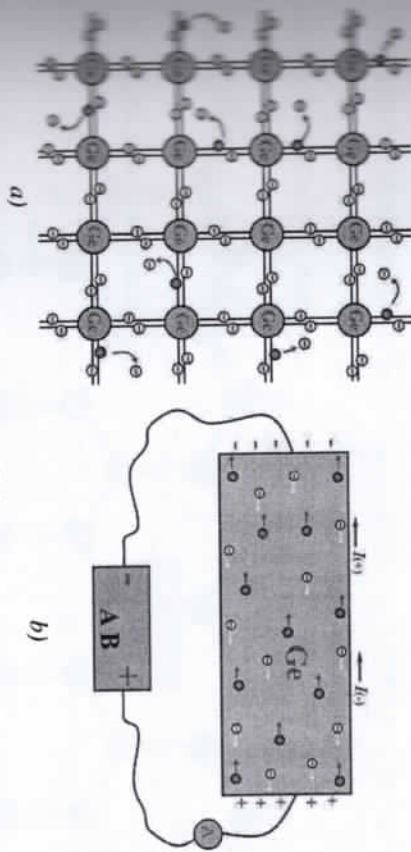


Рисунок 20.1

В чистом полупроводнике электрический ток возникает из-за движения электронов и дырок.

Так как число дырок равно числу электронов, то и силы тока, создаваемые их движением, также будут равны.

$$I_{np} = I_n \quad (20.1)$$

В чистом полупроводнике общий электрический ток составляет:

$$I_{обш} = I_{np} + I_n = 2I_{np} = 2I_n \quad (20.2)$$

Что произойдет, если мы выберем чистый полупроводник из группы III или группы V, а не из группы IV? Например, если мы возьмем элемент III или (In) группы III или мышьяк (As) группы V, эти чистые полупроводники имеют 3 или 5 валентных электронов во внешних оболочках, поскольку их валентные электроны равны 3 или 5.

Следовательно, каждый атом индия имеет 3 соседей, а элемент мышьяка-5, с которыми он образует ковалентные связи посредством валентных электронов (рис.20.2). Элементы III-группы или V-группы, такие как элемент IV-группы, ведут себя как диэлектрики при низких температурах, улучшая проводимость при повышении температуры. Атом индия красиво изображен, потому что валентные связи находятся в плоскости. Атом мышьяка, поскольку он образует пространственную ячейку с соседними атомами. Но индий или мышьяк нельзя использовать в качестве основного ингредиента. Поскольку они не находятся в твердом твердом состоянии, как германий или кремний. Поэтому в качестве примесей чаще используют элементы III-группы или V-группы.

Удельное сопротивление чистых полупроводников очень велико ( $\sim 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ), что означает, что при смешивании элементов III-группы или IV-группы с чистым полупроводником в количестве всего 0,001% удельное сопротивление полупроводника смешанного полупроводника увеличивается в  $10^5$  раз, т.е. ( $\sim 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ).

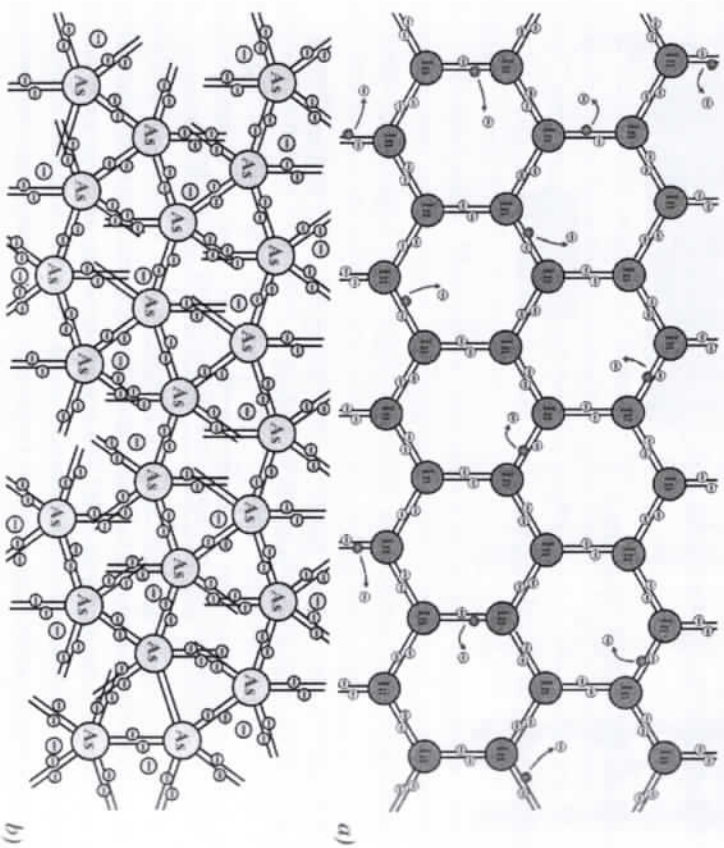


Рисунок 20.2

При добавлении к чистому полупроводнику очень небольшого количества другого полупроводника (например, к Германию фосфора или к кремнию Индия в количестве 0,001%) удельное сопротивление полупроводника резко уменьшается, а его электропроводность резко возрастает. При этом валентность смешиваемого полупроводника должна отличаться. Полупроводники с такими примесями могут быть двух типов.

**Полупроводник n-типа:**

Пусть кристалл германия (Ge) или кремния (Si), содержащийся в группе IV, смешан с небольшим количеством одного из элементов группы V, таких как мышьяк (As) или фосфор (P) или сурьма (Sb). Допустим, небольшое количество мышьяка (As) смешано с кристаллом кремния (Si). Какой процесс происходит в полупроводнике с такой примесью?

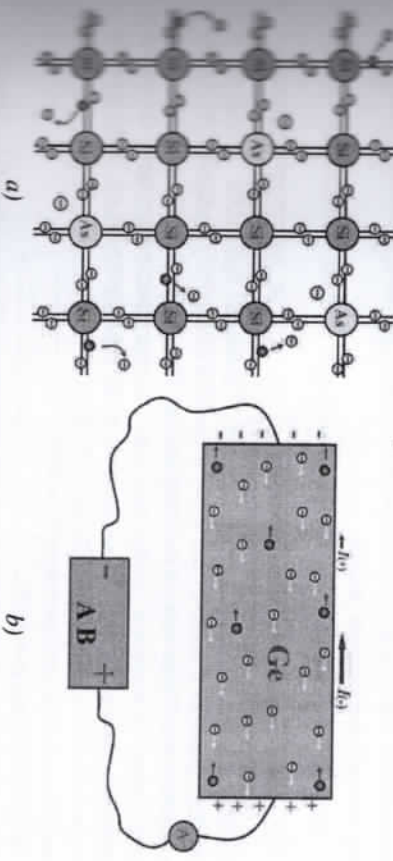


Рисунок 20.3

Поскольку атом мышьяка смешивается в очень небольших количествах, основная структура остается 4-структурой кремния, что означает, что мышьяк не влияет на структуру кремния. Атом мышьяка образует ковалентную связь с 4 соседними атомами кремния через 4 из своих 5 валентных электронов. Пятый электрон не участвует в ковалентной связи. Следовательно, этот электрон может стать свободным электроном в результате небольшого внешнего воздействия. Каждый атом мышьяка образует по одному свободному электрону. Поэтому проводник с такой примесью, которая отдает свой электрон, называется донорной (дающей) примесью. Поскольку в полупроводнике с донорной примесью электрический ток возникает из-за движения электронов, полупроводники такого типа называются полупроводниками n-типа. Где: n-производная от слова negative, означающего отрицательный (рис.20.3).

В полупроводниках p-типа даже из-за теплового движения возникает равное количество электронно-ковалентных пар, за исключением свободного электрона, который не участвует в ковалентной связи. Но общее количество электронов все равно остается больше, чем общее количество дырок.

В полупроводниках n-типа электроны являются основными носителями заряда, в то время как дырки являются неосновными носителями заряда.

$$I_{x1} \gg I_{дыр}, \quad I_{обш} = I_{x1} + I_{дыр} \approx I_{x1} \quad (20.3)$$

Когда на кристалл полупроводника p-типа воздействует электрическое поле, электроны, несущие основной ток, и дырки, несущие неосновной ток, движутся в противоположных направлениях, образуя общий ток. Но ток, создаваемый движением электронов, будет намного больше, чем ток, создаваемый движением дырок.

Таким образом, ток в полупроводнике p-типа возникает почти исключительно из-за движения электронов.

**Примесная проводимость.** Проводимость полупроводников при наличии примесей сильно изменяется, (добавка примесей фосфора в кристалл кремния в количестве 0,001 атомного процента уменьшает удельное сопротивление более чем на пять порядков). Необходимым условием резкого уменьшения удельного сопротивления полупроводника при введении примесей является наличие валентности атомов примеси от валентности основных атомов кристалла. Различают два типа примесной проводимости — *электроновую и дырочную* проводимости.

**Полупроводник p-типа:**

Пусть кристалл германия (Ge) или кремния (Si) в группе IV смешан с небольшим количеством одного из элементов, таких как Индий (In) или галлий (Ga) в группе III. Допустим, небольшое количество Индия (In) смешано с кристаллом кремния (Si). Какой процесс происходит в полупроводнике с такой примесью?

Поскольку атом индия смешивается в очень небольших количествах, основная структура 4-структурой кремния, что означает, что индий не влияет на структуру кремния. Атом индия отдает все свои 3 валентных электрона, образуя ковалентную связь с 3 из 4 соседних атомов кремния. Атом индия не имеет электронов для образования ковалентной связи с четвертым соседним атомом кремния. В результате там, где отсутствует электрон, образуется дырка. Следовательно, каждый атом индия образует дырку. Поскольку дырка сама по себе является акцептором электронов, проводник с такой примесью называется акцепторной (акцепторной) смесью. В связи с тем, что в полупроводнике с акцепторной примесью электрический ток происходит от движения дырок, полупроводники такого типа называются

полупроводниками p-типа. Где: p-производное от слова positive, означающее положительный (рис.20.4).

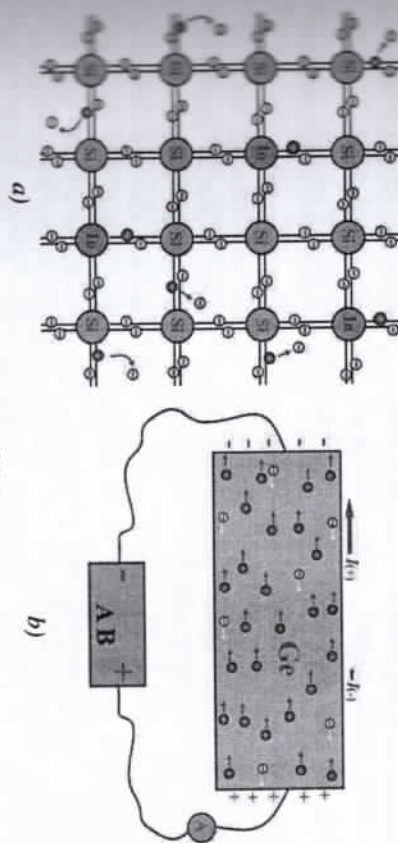


Рисунок 20.4

В полупроводниках r-типа даже из-за теплового движения возникает равное количество электронно-ковалентных пар, за исключением дырок, образующихся на месте электрона, который не достигает образования ковалентной связи. Но общее количество дырок все равно остается больше, чем общее количество электронов.

В полупроводниках r-типа дырки являются основными носителями заряда, а электроны являются неосновными носителями заряда.

$$I_{дыр} \gg I_{x1}, \quad I_{обш} = I_{дыр} + I_{x1} \approx I_{дыр}$$

Когда на кристалл полупроводника r-типа воздействует электрическое поле, электрические дырки носители основного тока движутся в противоположных направлениях, образуя общий ток. Но ток, создаваемый движением дырок, будет намного больше, чем ток, создаваемый движением электронов.

Таким образом, ток в полупроводнике r-типа возникает из-за движения дырок.

**Переход r - n:**

Для того чтобы полупроводник n-типа контактным с полупроводником r-типа (рис.20.5-а). Эти полупроводники не могут контактировать простым механическим способом. Потому что с помощью этого метода невозможно приблизить их друг к другу по размеру атомов. Приведение их к контакту можно представить следующим образом: пусть дан один из кристаллов германия (Ge) или кремния (Si), находящихся в IV-й группе. Пусть это будет чистый полупроводник, смешанный с первой половинной чистого полупроводника в количестве, меньшем, чем один из элементов, таких как индий (In) или галлий (Ga) из группы III, и со второй половиной элемента,

меньше, чем один из элементов, таких как мышьяк ( $As$ ) или фосфор ( $P$ ) или сурьма ( $Sb$ ) из группы V. Тогда можно будет предсказать, что полупроводники p-типа и n-типа являются наиболее идеальными контактами. Из них также можно сформировать контакт, расплавив один из этих смешанных полупроводников и поместив его поверх другого.

В момент контакта полупроводников p-типа и n-типа ( $t=0$ ) первоначально концентрация дырок в p-поле значительно больше, чем в n-поле, и наоборот, концентрация электронов в n-поле значительно больше, чем в p-поле (рис.20.5-а). Из-за явления диффузии дырки в p-поле начинают двигаться в n-поле, и наоборот, электроны в n-поле начинают двигаться в p-поле. Из-за движения этих основных носителей заряда в противоположном направлении возникает ток, известный как диффузионный ток. Другими словами, диффузионный ток возникает при переходе носителей тока из основной сферы в неосновную. Со временем дырки в n-поле и концентрации электронов в p-поле начинают увеличиваться. В результате из-за хаотического движения дырки в n-поле также могут проходить через p-поле, в то время как электроны в p-поле могут проходить обратно через n-поле (откуда они сначала пришли). При этом образуется так называемый дрейфовый ток. Другими словами, дрейфовый ток возникает при переходе носителей тока из неосновной сферы в основную. С момента образования контакта диффузионный ток уменьшается, а дрейфовый увеличивается. По прошествии определенного времени эти токи становятся количественно равными, и на границе контакта устанавливается динамическое (подвижное) равновесие. Это явление называется событием p-n перехода.

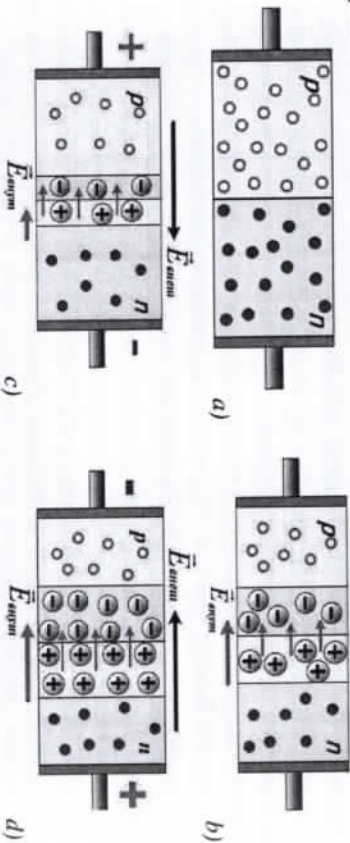


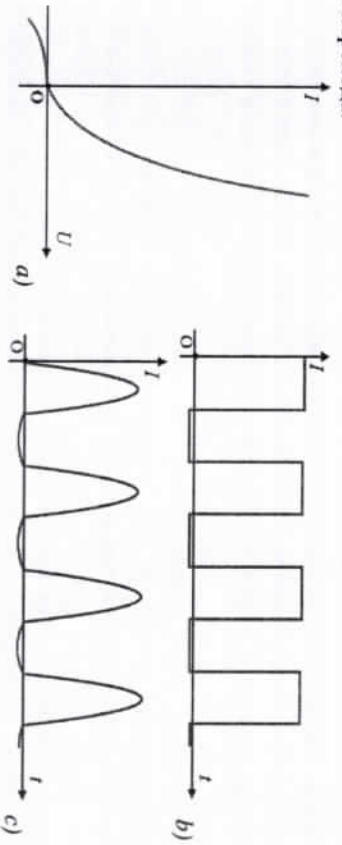
Рисунок 20.5

Полупроводники p-типа и n-типа начиная с момента контакта ( $t=0$ ) концентрация дырки в p-поле, концентрация электронов в n-поле начинает уменьшаться. Когда один дырка перемещается в n-поле, один отрицательный ион появляется из-за недостатка дырки в p-поле. Точно так же, когда один

электрон перемещается в p-поле, один положительный ион появляется из-за недостатка электронов в n-поле. Но эти ионы образуются на границе контакта. Со временем число отрицательных ионов в p-поле увеличивается, а число положительных ионов увеличивается в n-поле. Через определенное время на границе контакта образуются противоположно заряженные ионы, точно так же, как покрыты конденсатора, создавая внутреннее электрическое поле, направленное от положительного покрытия к отрицательному покрытию. Это электрическое поле обладает свойством тормозить диффузионный ток, ускорять дрейфовый ток. Иными словами, это поле всегда открыто для носителей неосновного тока, а для носителей основного заряда служит потенциальным барьером (рис.20.5-б). С момента прилегания проводников в контакт потенциальный барьер начинает возрастать, а при динамическом равновесии этот барьер достигает своего максимального значения. Поэтому через определенный промежуток времени диффузионный и дрейфовый токи становятся количественно равными, и на границе контакта устанавливается динамическое (подвижное) равновесие. Ионы в восьми p-полях, в которых установлено динамическое равновесие, концентрация электронов в n-поле достигает своего наименьшего значения, и потенциальный барьер не позволяет ему уменьшаться еще больше.

При динамическом равновесии потенциальный барьер приобретает определенную толщину (рис.20.5-6). Какое событие может произойти, если p-n полупроводников, находящихся в состоянии динамического равновесия, будут подключены к внешнему источнику? Если p-полупроводник соединен с (+) полюсом источника, а n-полупроводник соединен с (-) полюсом источника, такое соединение называется правильным соединением (рис.20.5-с). При этом электрическое поле внешнего источника  $E_{\text{внеш}}$  будет направлено в противоположном направлении к внутреннему полю  $E_{\text{внут}}$  потенциального барьера на границе, что приведет к сокращению ширины барьера. В результате дрейфовый ток уменьшается, а диффузионный увеличивается. Если p-полупроводник соединен с (-) полюсом источника, а n-полупроводник соединен с (+) полюсом источника, такое соединение называется обратной связью (рис.20.5-д). При этом электрическое поле внешнего источника направлено в том же направлении, что и внутреннее поле потенциального барьера на границе, что приводит к расширению ширины барьера. В результате дрейфовый ток увеличивается, а диффузионный уменьшается. Но поскольку дрейфовый ток генерируется неосновными носителями заряда, сила тока в обратной связи в тысячу раз меньше, чем сила тока в прямой связи. Поэтому даже контактные p-n полупроводники обладают свойством

пропускать ток только в одну сторону. Работа диодов основана на явлении  $p$ - $n$  перехода.



20.6-г-д-и-м

Вольт-амперная характеристика диода изображенная на рис 20.6-а. Если подключить концы диода, к полюсам источника постоянного тока в равные промежутки времени, то ток пройдет по графику на рис.20.6-б. Если подключить концы диода к полюсам источника переменного тока, то ток увеличиваются и будет проходить по графику на рисунке 20.6-с, так как полюса этого источника тока автоматически замещается.

**Вопросы по теме:**

1. Приведите примеры полупроводниковых элементов.
2. Что называют чистым полупроводником?
3. Что называется полупроводником  $p$ -типа?
4. Что называется полупроводником  $n$ -типа?
5. Что такое донорская смесь? Что такое акцепторная смесь?
6. Объясните явление  $p$ - $n$  перехода.
7. Что такое диффузионный ток? Дрейфовые токи?
8. Что такое правильное соединение? Что такое обратная связь? За счет каких токов они образуются?
9. Что такое диод? На чем основан принцип работы диода? Какова функция диода?

**Решение задач:**

1. Из чистого полупроводника за счет упорядоченного движения электронов проходит ток 1 мА. Какова сила полного тока (мА), проходящего через полупроводник?

- А) 0 В) 0,5 С) 1 Д) 2 Е) 3

Дано: $I_g = 10^{-3} \text{ A}$	Решение: Ток, создаваемый движением электронов в чистом полупроводнике $I_g = 10^{-3} \text{ A}$ . Из этого полный ток $I_{\text{общ}} = I_{gn} + I_{dnp}$ (здесь $I_g = I_{dnp}$ ) $I_g = 2 I_g = 2 \text{ мА}$ Ответ: $I_g = 2 \text{ мА}$
------------------------------------	--

**§ 21. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ**

**Электронная эмиссия:**

Нагретые электроны на внешнем оболочке атомов металлов будут гораздо слабее связаны с ядром. Поэтому эти электроны будут принадлежать не тому или иному атому, а всему кристаллу, всем атомам в кристалле. Число свободных электронов в металле равно произведению валентных электронов на число атомов.

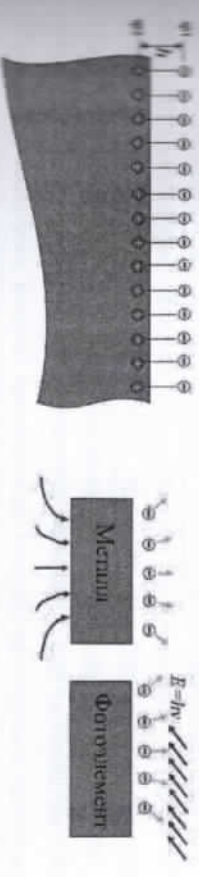


Рисунок 21.1

Свободные электроны участвуют в тепловом движении внутри металла и движется между кристаллическими решетками с хаотичным движением со скоростью около  $v \approx 100 \text{ км/с}$ . Атомы, находящиеся в кристаллических решетках, совершают пространственное колебательное движение вокруг кристаллических узлов. Свободные электроны могут также попадать на атом в узле во время его движения или он также может проходить между атомами в узлах. Попадая на поверхность металла, свободные электроны могут как прыгнуть между атомами, так и выскочить за пределы кристаллических решеток и становиться абсолютно свободными (рис.21.1). Но для этого потребуется достаточно большая скорость. Потому что, когда электрон выскочит за пределы кристалла, в кристалле возникает дефицит электронов, и поверхность кристалла становится зарядом  $+e$ . Электрическое поле этого заряда тормозит вылетающий электрон и не дает ему покинуть поверхность кристалла. Точно так же, как камень, брошенный в небо, поднимается на высоту и падает обратно, на поверхности металла происходит скачкообразное движение. Через каждые  $1 \text{ см}^2$  поверхности металла в секунду с поверхности кристалла вылетают и снова падают триллионы электронов, то есть

происходит триллионы скачкообразные движения. Его можно найти по высоте микроскопички  $\frac{m_e g^2}{2} = k e^2$ . Согласно ему, микроскопички происходит в порядке

$$h = r = \frac{2k}{m_e} \left( \frac{e}{g} \right)^2 \approx 0,05 \text{ мкм}. \text{ Поверхность металла будет иметь знак (+), а}$$

отскокившие электроны будут похожи на обложочки конденсатора, заряженные знаком (-). Между этими слоями образуется приблизительно однородное электрическое поле с разностью потенциалов  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ , которое приобретает свойство тормозить вылетающие с поверхности металла электроны (рис.21.1). Кинетическая энергия летящего электрона должна иметь такое значение, пусть при выполнении работ, равной этой энергии, тормозящий сможет полностью преодолеть электрическое поле.

*Энергия, необходимая электрону, чтобы полностью оторваться от поверхности металла, называется работой выхода электрона с поверхности металла.*

$$A_{\text{вых}} = \frac{m_e g_0^2}{2} = e(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (21.1)$$

Для разных металлов работа выхода электрона будет отличаться, и почти для всех металлов будет значение работы выхода  $A_{\text{вых}} > 1 \text{ eV}$ . При обычной комнатной температуре средняя кинетическая энергия электрона в металле близка к  $E_k \approx 0,04 \text{ эВ}$ , и даже число электронов с энергией  $0,1 \text{ эВ}$  составляет очень небольшую долю от общего количества свободных электронов. Поэтому при обычных температурах выделения электронов из теплого происходит вообще. В большинстве металлов выход электронов из теплового движения происходит при гораздо более высоких температурах, то есть выше  $2000 \text{ К}$ .

Явление вылетание электронов с поверхности нагретого металла называется явлением термоэлектронной эмиссии.

Вообще говоря, энергия, необходимая электронам для выхода, может отдаваться различными способами, а не только за счет нагрева. Например, освещение светом, ультрафиолетом, рентгеновскими лучами, бомбардировка  $\alpha$ -лучами, разрыв с помощью сильного электрического поля и т. д. Вы возбуждение свободного электрона внутри металла под действием излучение светом называется фотоэлектронной эмиссией, тепловое излучение-термоэлектронной эмиссией, а сильное электрическое поле-автоэлектронной эмиссией.

Общая энергия, переданная электрону, расходуется на работу выхода и максимальную кинетическую энергию электрона.

$$E = A_{\text{вых}} + \frac{m_e g_{\text{max}}^2}{2} \quad \text{или} \quad h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{m_e g_{\text{max}}^2}{2} \quad (21.2)$$

*Термоэлектронная лампа-диод:*

Для наблюдения за термоэлектронным излучением можно использовать вакуумную лампу внутри с двумя электродами. Один из электродов представляет собой металл с высокой температурой плавления (вольфрам, молибден и др.) и представляет собой электрод называется катодом, который нагревается током, Второй электрод-это холодный электрод, который находится в себе электроны, выходящие из катода, который называется анодом (рис.21.2, а). На рис.21.2, б изображен вакуумный диод. На рисунке 21.2, в к вакуумной лампе через выключатель подключены две вакуумные лампы АВ<sub>1</sub> и АВ<sub>2</sub> с переменным напряжением. Одна из батарей АВ<sub>1</sub> способна создавать сильное или слабое электрическое поле в пространстве между этими электродами, отдавая между катодом и анодом деионизированные потенциалы. Вторая из батарей АВ<sub>2</sub> нагревает катод до высокой температуры, испаряя с поверхности катода термоэлектроны, а вокруг катода образуется электронное облако. Чем больше напряжение батарей, тем больше электронное облако вокруг катода. Эти термоэлектроны направляются к аноду с помощью электрического поля, создаваемого батареей АВ<sub>1</sub>.

Для начала рассмотрим состояние брешка К<sub>2</sub>, к которому подключен ключ К<sub>1</sub>. При этом, поскольку катод изолирован от источника тока, он находится в коллоидном состоянии и не излучает электроны из себя. Следовательно, в вакууме между катодом и анодом не будет заряженных частиц, несущих ток. И регуляторе миллиамперметр mA в цепи покажет ноль, даже если включатель К<sub>1</sub> подключен.

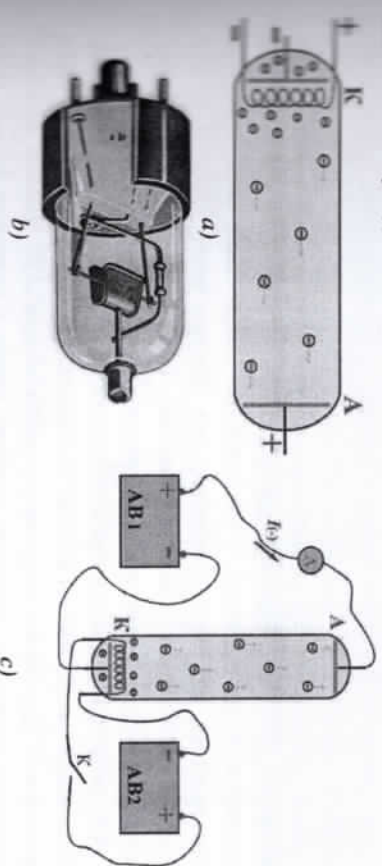


Рисунок 21.2

Теперь, когда мы подключаем катод  $K_2$ , катод начинает медленно нагреваться. При достаточном повышении температуры металл катода начинает испарять электроны с себя из-за явления термоэлектронной эмиссии. Испаряющиеся электроны образуют облако электронов вокруг катода. Выключатель  $K_1$  подключен, но даже если напряжение аккумулятора  $AB_1$  равно нулю, миллиамперметр ма показывает, что в цепи проходит ток, хотя и небольшой. Это связано с тем, что некоторая небольшая часть электронов, испаряющихся с катода, попадает на анод из-за хаотического движения. Такое положение соответствует точке В на рисунке 21.3, а где сила тока в цепи равна значению  $I_{0B}$ .

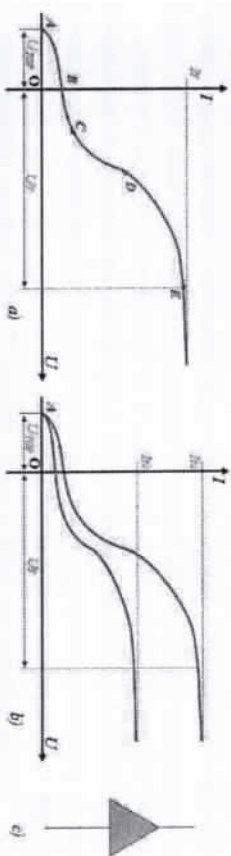


Рисунок 21.3

Теперь, когда напряжение батареи  $AB_1$  начинает постепенно увеличиваться, у нас будет кривая  $BCDE$ , показанная на рисунке 20.3-а. Увеличение силы тока в цепи начинает замедляться с точки  $D$ . Независимо от того, насколько сильно мы увеличиваем напряжение аккумулятора, значение силы тока не превышает  $I_D$ . Это значение силы тока называется током насыщения. Это показывает, сколько электронов испаряется на катоде за единицу времени, в то время как все эти электроны достигают анода за это время.

Для дальнейшего увеличения значения тока насыщения необходимо увеличить напряжение аккумулятора  $AB_2$ , то есть увеличить мощность источника. Тогда за единицу времени с катода испарится больше электронов, а также увеличится сила тока в цепи. При этом величина тока насыщения будет больше. На рисунке 20.3,б дана вольт-амперная характеристика для двух состояний, при которых катод слабо и сильно нагревается. Значения токов насыщения, соответствующих этим двум состояниям, —  $I_{H1}$  и  $I_{H2}$ , которые начинаются с одного и того же значения.

$AB_1$  даже при нулевом напряжении аккумулятора в цепи была сила тока, равная значению. Возникает вопрос, что делать, чтобы сила тока в цепи была равна нулю. Для этого напряжение аккумулятора  $AB_1$  должно обладать тормозным свойством. Другими словами, полюс (-) батареи должен быть подключен к аноду, а Полюс (+) должен быть подключен к катоду, что

означает, что полюс батареи должен быть подключен взаимозаменяемо. При подаче на батарею отрицательного потенциала даже самые быстрые электроны, испаряясь с катода, не могут пойти до анода, т. е. максимальная кинетическая энергия термоэлектрона расходуется на движение против электрического поля.

$$\frac{m_e g_{\text{max}}^2}{2} = eU_T \quad (21.3)$$

Здесь:  $U_T$  — тормозной потенциал батареи  $AB_1$ .

На рисунке 21.3-а, б изображен график вольт-амперной характеристики аккумулятора.

Электронные лампы с двумя электродами обладают свойством пропускать ток в одну сторону. Термоэлектроны движутся от катода к аноду, но не движутся от анода к катоду. Поэтому, ток проходит от анода к катоду, а от катода к аноду не проходит. Устройство, которое проводит ток в одну сторону, называется диодом. На рисунке 21.3-в приведено схематическое изображение диода. Также диоды используются в преобразовании переменного тока, к постоянный. Дамповые диоды применялись в микроэлектронике и радиотехнике вплоть до последних десятилетий прошлого века, в настоящее время это функции занимают полупроводниковые диоды и транзисторы.

#### Вопросы по теме:

1. Что называют явлениями термоэлектронной эмиссии?
2. Напишите закон сохранения энергии для явления термоэлектронной эмиссии.
3. Какова работа выхода, максимальная кинетическая энергия и тормозное потенциал?
4. Как определяется максимальная скорость термоэлектрона?
5. Что такое тормозной потенциал?
6. Что такое ток насыщения? Объясните почему.
4. Нарисуйте вольт-амперную характеристику для явления термоэлектронной эмиссии.

#### Решение задач:

1. Каков ток (мА) в анодной цепи, если каждую секунду с катода выделается  $5 \cdot 10^{16}$  электронов?

- A) 5    B) 8    C) 9    D) 10    E) 11

Дано:

$$N = 5 \cdot 10^{16}, \quad t = 1 \text{ с}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Решение:  

$$I = \frac{q}{t} = \frac{Ne}{t} = 8 \text{ мА}$$

$$I = 8 \text{ мА}$$

1-?

Ответ:  $V$  8 мА.

2. В тельцовонной трубке расстояние от анода до экрана электроны проходят при 4 нс. Сколько кВ ускоряющего напряжения в кинескопе? Расстояние от анода до экрана 30 см. Начальная скорость равна нулю.  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Дано:

$$t = 4 \cdot 10^{-9} \text{ с}, v_0 = 0$$

$$S = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$U$  - ?

Решение:

Здесь электроны движутся с ускорением.

$$S = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} \text{ и } S = v_0 t + \frac{at^2}{2} \text{ от этой выражения } a = \frac{2S}{t^2}$$

$v = \frac{2S}{t}$  преобразуем, из закона сохранения энергии

$$\frac{mv^2}{2} = eU \text{ подучаем.}$$

$$U = \frac{m_e S^2}{2et^2} = 16000 \text{ В} = 16 \text{ кВ}$$

Ответ: 16 кВ.

## § 22. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ. ГАЗОВЫЕ РАЗРЯДЫ.

Газовый разряд:

Если атом не является нейтральным (при недостатке или избытке электронов), такой атом называют ионом. Мы называем это отрицательным ионом, если электрон в избытке, и положительным ионом, если электрон в дефиците. Когда молекулы газа сталкиваются друг с другом, если столкновение достаточно сильное, один электрон в атоме либо выталкивается наружу, либо переходит к соседнему атому, то есть происходит ионизация нейтральной молекулы. При комнатной температуре взаимодействия молекул воздуха из-за теплового движения недостаточно для ионизации этих молекул. Следовательно, для ионизации этих молекул необходимо дополнительное внешнее воздействие. Давайте соберем цепочку на рисунке 22.1-а. Сначала амперметр покажет ноль. Потому что при комнатной температуре воздух обложками конденсатора является диэлектриком. Если мы нагреем воздух между покрытиями в газовом пламени или осветим расстояние между покрытиями ультрафиолетовыми лучами, амперметр покажет, что ток проходит. С увеличением напряжения увеличивается и сила тока. Напряжение, однако, может быть увеличено путем перемещения переключателя реостата вправо.

Явление прохождения тока в газах называется газовым разрядом. Поясним приведенный на рисунке 22.1-а газовый разряд вольт-амперной характеристикой, приведенной на рисунке 22.1-б.

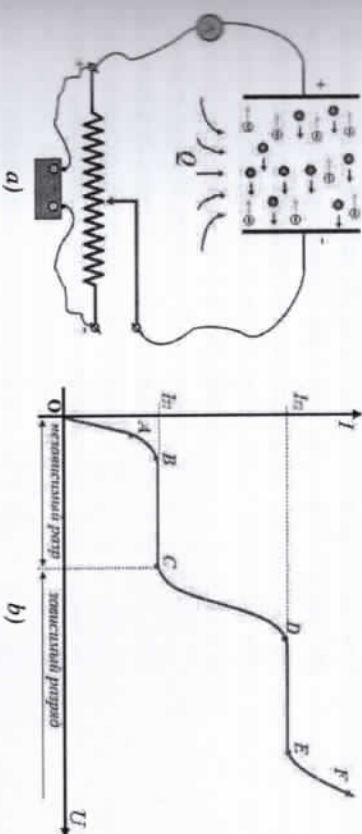


Рисунок 22.1

В интервале  $OA$ , сила тока увеличивается пропорционально увеличению напряжения. Чем больше увеличивается напряжение, тем больше ионов достигает оболочек. Это наблюдается при промежуточных малых напряжениях.

$AB$  — увеличение тока замедляется;

$BC$  — увеличение тока прекращается. Сколько ионов генерируется за единицу времени через ионизатор, за это время все ионы достигают оболочек;

Снова наблюдается увеличение тока  $CD$ . Между покрытиями энергия, которую электроны получают от электрического поля между двумя столбиконенциями, достаточно  $W = eEd$ , чтобы выбить электрон из него при столкновении с атомом. В этом интервале ионы не могут выбивать электроны из него при столкновении с атомами. Потому что, поскольку размер ионов намного больше, чем размер электронов, путь свободного пробега ионов намного меньше, чем путь электронов, и энергия, которую они получают на этом свободном пробеге, также будет намного меньше. Поэтому, когда энергия электронов достаточно для ионизации нейтрального атома, энергия ионов во много раз меньше энергии ионизации. Причина, по которой сила тока в этой части графика снова увеличивается, заключается в том, что свободные электроны, кроме ионизатора, также действуют как дополнительная ионизатор. Поэтому такую ионизацию называют ударной ионизацией;

$DE$  — Увеличение тока снова прекратится. Все атомы между покрытиями полностью ионизированы, и все они участвуют в транспортировке тока;

Увеличение тока  $DE$  снова прекратится. Все атомы между покрытиями полностью ионизированы, и все они участвуют в транспортировке тока;



$E$  — если с этой точки напряжение увеличивается, то снова наблюдается увеличение тока. Возникает вопрос, за счет чего происходит увеличение тока, если все атомы между покрытиями ионизированы. При этом положительные ионы достигают такой энергии на своем пути свободного пробоя, что, когда они идут к катоду и ударяются, они могут выбивать электроны с поверхности катода, что означает, что энергия положительных ионов равна работе на выходе. Такое явление выброса электронов с катода называется вторичной электронной эмиссией. Кроме того, электрон на катоде может быть разорван, когда электрическое поле слишком велико. При этом, образуящиеся электроны, называются автоэлектронами.

Таким образом, электрический ток в газе возникает из-за упорядоченного движения положительных и отрицательных ионов и электронов. Сила тока, создаваемая движением положительных ионов, равна сумме сил тока, создаваемых движением отрицательных ионов и электронов.

$$I_{\text{общ}} = I_{(+)} + I_{(-)} + I_{\text{эл}}, \quad I_{(+)} = I_{(-)} + I_{\text{эл}} \quad (22.1)$$

$$W = e E \lambda \quad (22.2)$$

#### Несамостоятельные и самостоятельные разряды:

На рисунке 22.1-б, белая часть графика называется самостоятельным разрядом. Потому что в этом интервале разряд происходит только за счет внешнего ионизирующего воздействия. А при прекращении внешнего воздействия прохождение тока по цепи также прекращается, то есть амперметр показывает ноль.

Разряд, осуществляемый только за счет внешнего ионизирующего воздействия, называется самостоятельным разрядом.

На рисунке 22.1-в, часть  $CF$  графика называется самостоятельным разрядом. Это связано с тем, что даже при выключении пламени, ионизирующего интервал между покрытиями, или при прекращении освещения осветляющими ультрафиолетовыми лучами, ток в цепи будет продолжаться. Потому что ионы (+), достигшие (-) покрытия, обладают такой энергией, что могут свободно выбивать электроны с поверхности покрытия. Эти автоэлектроны генерируют дополнительный ток, превращая нейтральные молекулы в электроны, положительные и отрицательные ионы за счет энергии, накопленной на их свободном беговом дорожке, даже без внешнего воздействия. Это может быть похоже на лавинная опасность, падающий с вершины горы. Расчеты показали, оказывается, можно формировать десятки тысяч пар положительных и отрицательных ионов, прежде чем они достигнут каждого автоэлектронного (+) покрытия.

Разряд, который также происходит, когда прекращается внешнее ионизирующее воздействие, называется мутательным разрядом. Самостоятельный разряд также в свою очередь подразделяется на несколько видов.

#### Виды самостоятельного разряда:

1) **Коронный разряд.** В воздухе наблюдается в тех случаях, когда при атмосферном давлении присутствует сильное электрическое поле, не являющееся однородным. Например, коронный разряд происходит в темную ночь вокруг высоковольтной линии электропередачи или даже в затемненной комнате вокруг проводов, подключенных к высоковольтной линии, наблюдается излучение, похожее на солнечную корону. Кроме него коронный разряд наблюдается также вокруг троса, на концах мачт кораблей, на концах дерева. Коронный разряд происходит следующим образом: положительные ионы, образуясь вокруг провода высокого напряжения, движутся в сторону отрицательного электрода и отталкиваются от него электроны, которые, в свою очередь, также ионизируют молекулы газа. В этом процессе происходит излучение. Чтобы можно было наблюдать коронный разряд достаточно иметь проволоку и концы проволоки с большим радиусом кривизны. При этом необходимо иметь второй электрод. Его функцию выполняют любые провода, которые изменились. Коронный разряд наблюдается, когда электрическое поле достигает 30 000 В/м. Коронный разряд нестабилен и состоит из большого количества микроразрядов, образующихся в разное время вблизи проводника (рис. 22.2). Коронный разряд используется в качестве электрического фильтра, который очищает промышленные газы от мелких частиц.



Рисунок 22.2

2) **Искровой разряд.** Этот разряд также имеет характер нестабильного разряда, такого как коронный разряд. Рисунок 22.3. Если коронный разряд наблюдается только вблизи проводников, искровой разряд может произойти, когда расстояние между проводниками велико. При очень сильном электрическом поле ( $E = 3000 \text{ kV/m}$ ) между электродами при атмосферном давлении в результате

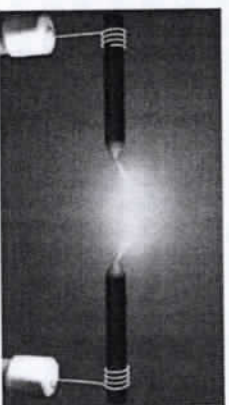


Рисунок 22.3

ударной ионизации возникает кратковременный разряд – искровой разряд (рис.22.3).

Искровой разряд имеет вид ярко излучающего изогнутого разветвленного канала, по которому проходит импульс короткого замыкания, мощность которого очень велика. Молния (гроза) является примером. В больших молниях длина молнии может достигать до 10 км, диаметр ее канала-до 40 см, а сила тока-до 10 кА. Длительность импульса при этом составит  $10^{-4}$  с (рис.22.4). Каждая молния будет состоять из нескольких импульсов, идущих последовательно по одному каналу. Температура газа в искровом канале очень высокая-достигает 10 000 К.

При этом быстрый сильный нагрев газа приводит к резкому повышению давления и появлению звуковых волн. Именно поэтому после удара молнии слышен сильный гром. Резкое повышение температуры в канале молнии создает условия для образования газа озона ( $O_3$ ).

3) **Дуговой разряд (электрическая дуга).** Этот разряд происходит в различных газах при давлении от десятых долей атмосферного давления до нескольких тысяч атмосфер. Дуговой разряд-это разряд, который имеет практическое значение в газовых разрядах.

Для образования электрической дуги берут два угольных стержня, на них подается напряжение 40–50 В напряжение, а их концы сначала прикасаются друг к другу. При этом между концами обоих стержней прикасаются друг к другу одновременно происходит ослепительно яркое излучение. Тогда при некотором удалении электродов друг от друга между ними образуется самостоятельный газовый разряд, называемый электрической дугой, дающий мощный свет в виде дуги. Первым применил электрическую дугу русский академик В.В.Петров обнаружил его в 1802 году.

Повышение температуры дуговым разрядом 2500–4000°С применяют в металлургии в электродных, получающих тепло от дугового разряда, при



Рисунок 22.4



Рисунок 22.5

сварке металлов (рис.21.5). Дуговой разряд-очень мощный источник света. Он используется в проекторах, проекционных аппаратах и пленочных аппаратах.

4) **Тлеющий разряд.** Самостоятельный газовый разряд происходит при выполнении соотношения  $eEl \geq A$ . Из формулы следует, что самостоятельный разряд можно получить двумя путями: либо увеличивать напряженность  $E$  поля либо увеличивать длину свободного пробега  $l$ . Чтобы увеличить длину свободного пробега заряженных частиц в газе, необходимо уменьшить давление газа (разредить газ). При малых давлениях (десятые и сотые доли миллиметра ртутного столба) в трубке наблюдается тлеющий разряд при достаточно низких напряжениях между электродами (несколько сотен и меньше вольт). При тлеющем разряде почти вся трубка, за исключением небольшого участка возле катода, заполнена однородным свечением, называемым положительным столбом. Газ на темном катодном пространстве не светится так как электроны еще не приобрели энергии достаточной для ионизации молекул.

Этот разряд образуется при низких давлениях, то есть в десятках, сотнях долей миллиметрового ртутного столба давления. Для образования тлеющего разряда берем стеклянную трубку, к которой с двух сторон привинчены электроды и отсасывается воздух, и подключаем электроды к розетке переменного тока напряжением в несколько сотен вольт (рис.22.6).



Рисунок 22.6

Радиационный характер воздуха в канале будет зависеть от степени его разреженности. Сначала между электродами образуется “нитеобразный” газовый разряд, а затем весь воздух внутри флейты излучает свет красноватого цвета. Такой мерцающий разряд образуется за счет ионизации ударными импульсами молекул газа электронов, выбитых положительными ионами из катода. Оказывается, цвет излучения также меняется при изменении газа в трубке. Например, аргон дает синий цвет, неон-красный, а гелий-желтый.

Поскольку в тлеющем разряде концентрация ионов, а также число нейтральных атомов невелики, а количество выделяемого в газе тепла невелико, излучение состоит из холодного излучения. Вспышка используется в лампах дневного света для создания газосветовых трубок, которые широко используются в рекламе, излучающей свет.

### Понятие плазмы:

При достаточно больших температурах начинается ионизация газа за счет столкновений быстро движущихся атомов или молекул. Вещество переходит в новое состояние, называемое плазмой. Плазма - это частично или полностью ионизованный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически совпадают. Плазма в целом является электрически нейтральной системой. Степень ионизации может быть различной. В полностью ионизованной плазме нейтральных атомов нет.

Наряду с нагреванием ионизация газа и образование плазмы могут быть вызваны резонансами излучениями или бомбардировкой атомов газа быстрыми заряженными частицами. При этом получается так называемая *низкотемпературная плазма*.

Плазма обладает рядом специфических свойств, что позволяет рассматривать ее как особое четвертое состояние вещества. Из-за большой подвижности заряженные частицы плазмы легко перемещаются под действием электрических и магнитных полей.

Проводимость плазмы увеличивается по мере роста степени ионизации. При высокой температуре полностью ионизованная плазма по своей проводимости приближается к сверхпроводникам.

В состоянии плазмы находится подавляющая (около 99%) часть вещества Вселенной. Вследствие высокой температуры Солнце и другие звезды состоят в основном из полностью ионизованной плазмы.

Газ, в котором все молекулы и атомы или большая их часть ионизированы, называется плазмой. Плазма представляет собой смесь положительных ионов, электронов и неионизированных молекул и атомов. В зависимости от степени ионизации различают слабо ионизированную, умеренно ионизированную, полностью ионизированную плазму. В зависимости от скорости заряженных частиц различают низкотемпературную и высокотемпературную плазму. Низкотемпературной или холодной плазмой называют плазму, температура которой не превышает  $10^5$  К. Плазмы с температурой выше  $10^5$  К называются высокотемпературными или кипящими плазмами. Газоразрядная плазма обычно соответствует холодной плазме. В кипящей плазме молекулы движутся с большой скоростью и имеют необходимую энергию для их ионизации.

Плазмы в целом нейтральны. Электропроводность плазмы переменная в широком диапазоне. Электропроводность горячей плазмы близка к электропроводности металлов, а проводимость слабо ионизированной плазмы в десять тысяч раз меньше, чем у металлов. Верхний слой атмосферы Земли образует слабо ионизированную плазму под действием постоянного

ионизатора (поступающего от Солнца потока ультрафиолетовых, рентгеновских лучей и других заряженных частиц), и этот слой называется ионосферой. Мы также сталкиваемся с плазмой в нашей повседневной жизни. Костер, рекламные трубки, лампы дневного света-все это слабая холодная плазма.

### Вопросы по теме:

1. Как образуются газовые разряды? От движения каких частиц возникает ток в газе?
2. Нарисуйте и объясните волны-амперную характеристику газа.
3. Запишите свободную беговую дорожку и энергию, которую она получает от заряженных частиц.
4. Что называется независимым и непостоянным предожением?
5. Перечислите виды самостоятельных разрядов и объясните их.

### Решение задач:

1. Какой ток возникает от движения положительных ионов, если при разряде в газе от движения отрицательных ионов возникает ток 10 мА, а от движения электронов-ток 30 мА. Чему равна полная сила тока в момент разряда газа?

Дано:

$I_+ = 10$  мА Известно, что разряд в газе создается движением

$I_{э\text{л}} = 30$  мА отрицательного иона, положительного иона и

$I_+ = ?$ ,  $I_{\text{обш}} = ?$  электронов.

$$I_{\text{обш}} = I_+ + I_+$$

Но сила тока, создаваемая движением положительных ионов, равна силе тока, создаваемой движением отрицательных ионов и электронов.

$$I_+ = I_- + I_e = 10 \text{ мА} + 30 \text{ мА} = 40 \text{ мА}$$

Общая сила тока будет равна:

$$I_{\text{обш}} = I_- + I_+ + I_e = 10 \text{ мА} + 30 \text{ мА} + 40 \text{ мА} = 80 \text{ мА}$$

Ответ:  $I_+ = 40$  мА;  $I_{\text{обш}} = 80$  мА

### ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ГЛАВЕ III

Лабораторная работа: № 5.

Определение электрохимического эквивалента меди.

Цель работы: изучить явление электролиза. Изучение первого закона Фарадея на опыте. Изучение определения электрохимического эквивалента меди.

Необходимые приборы и оборудование: источник постоянного тока, электронные весы и секундомер, реостат, электролитическая ванна, дистиллированная вода, раствор купороса меди, электроды, амперметр и вольтметр постоянного тока, соединительные провода и другая вспомогательная броня.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Согласно 1-му закону Фарадея, масса  $m$  вещества, выделяющегося на электроде при прохождении электрического тока через электролит, пропорциональна силе тока  $I$  и времени прохождения тока  $t$ :

$$m = kIt = kq \quad (1)$$

Исходя из уравнения (1), коэффициент электрохимического эквивалента измеряется в кг/Кл в системе измерения СИ. Если известны сила тока  $I$ , прошедшего через электролит, и время прохождения тока, а также масса  $m$  вещества, выделившегося в процессе электролиза, электрохимический эквивалент вещества определяется как:

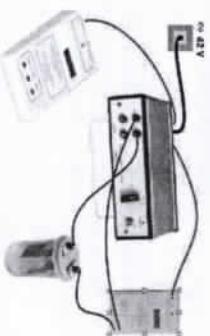
$$k = m / It \quad (2)$$

### Порядок выполнения работ

1. Изучите инструкцию к лабораторной работе, прочитав ее, и получите разрешение на выполнение работы, ответив на вопросы преподавателя
2. Определите массу  $m$  медного электрода, выступающего в роли катода, взвешиванием на электронных весах.

Примечание. Электрод обязательно должен высохнуть перед взвешиванием!

3. Взвесьте массу  $m$  из купороса меди и приготовьте раствор, растворив его в дистиллированной воде.
4. Опустите в раствор купороса меди медные электроды и закрепите их неподвижно.



5. Установить время начала эксперимента и сразу же подключить выключатель и с помощью реостата поддерживать величину силы тока без изменения на величину  $1,5 \text{ A}$ . Отметьте ток  $I$ , показанный амперметром, и запишите его.
6. Результаты, определенные в эксперименте, занести в таблицу 1.

7. Отключите выключатель после прохождения тока через электролит в течение 15-20 минут и установите таймер  $t_2$ . Рассчитать время прохождения тока через электролит.

8. Вытащите катод из раствора и дайте ему высохнуть. Чтобы определить массу меди, выделяющуюся на катоде, взвесьте электрод, на котором расположен медь, на электронных весах и вычислите  $\Delta m$  ее из выражения  $\Delta m = m_2 - m_1$ , т. е. общей массы меди, выделяющейся на электроде в процессе.

9. На основании результатов эксперимента вычислить электрохимический эквивалент меди с помощью уравнения (2).
10. Повторите опыт и рассчитайте их погрешности.
11. Результаты пишите в виде:  $k \pm \Delta k$ . Повторите опыт и рассчитайте их погрешности.

таблица 1

№	Сила тока $I$ , А	Время $t$ , с	$m_1$ , мг	$m_2$ , мг	$m_2 - m_1 = \Delta m$ (мг)	$k$ , мг/Кл	$\Delta k$ , мг/Кл	$\frac{\Delta k}{k}$ , %	$\varepsilon$
1									
2									
3									

### Контрольные вопросы

1. Что называется электролизом?
2. Напишите формулы I, II, законов Фарадея.
3. Что несет электрический ток в жидкостях?
4. В чем заключается физический смысл числа Фарадея?

### ТЕСТЫ ПО ГЛАВЕ III

1. Какие из пунктов, изложенных ниже, ошибочны:
  - 1) в электролитах ток состоит из потока свободных электронов;
  - 2) дистиллированная вода не является электролитом;
  - 3) образование незаряженной частицы в результате слияния заряженных ионов с разными свойствами называется моляризацией;
  - 4) отношение числа молекул, разделенных на ионы, к числу всех молекул растворенного вещества называется коэффициентом диссоциации;
  - 5) жидкости, проводящие электрический ток, называются электролитами?

А) 1, 5    В) 2    С) 1    D) 3, 4    E) 2, 5
2. Как изменяется проводимость электролитов при повышении температуры?
 

А) увеличивается    В) уменьшается  
С) зависит от количества электролита    D) не изменяется
3. Как изменится сила тока, если без изменения напряжения увеличить расстояние между электродами ванны?
 

А) может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от типа вещества.  
В) увеличивается    С) уменьшается    D) не меняется.
4. От чего зависит количество вещества, выделяющегося при электролизе?
 

А) напряжением    В) силе тока    С) сопротивлением

Д) на количество заряда, прошедшего через электролит Е) на время

5. Сколько меди выделяется на катоде при токе  $1000 \text{ А}$  за  $0,3 \text{ с}$  из раствора  $\text{CuSO}_4$ ? Электрохимический эквивалент меди составляет  $3,3 \cdot 10^{-7} \text{ кг/Кл}$ .

А)  $0,1 \text{ г}$  В)  $0,1 \text{ кг}$  С)  $1 \text{ г}$  Д)  $1 \text{ кг}$  Е)  $3,3 \text{ г}$

6. Как известно, при электролизе раствора  $\text{HCl}$  на катоде выделяется водород, а на аноде-хлор. Во сколько раз масса выделившегося при этом хлора больше, чем водорода? Молярная масса водорода составляет  $2 \text{ г/моль}$ , а хлора  $36 \text{ г/моль}$ .

А) 72 В) 36 С) 18 Д) 9 Е) 3

7. Ванны с растворами  $\text{CuSO}_4$  и  $\text{CuCl}_2$  соединили последовательно, провода через них постоянный ток. Сравните массы ( $m_1$  и  $m_2$ ) меди, выделяющейся в обеих ваннах в одно и то же время.

А)  $m_1 = 2m_2$  В)  $m_2 = 2m_1$  С)  $m_1 = m_2$   
Д)  $m_1 = 4m_2$  Е)  $m_2 = 4m_1$

8. Для каких веществ тепловой коэффициент сопротивления отрицателен?

А) электролиты, полупроводники В) электролиты, металлы  
С) металлы Д) диэлектрики Е) металлы, диэлектрики

9. Сопротивление полупроводника при повышении температуры ...

А) уменьшается В) не изменяется С) увеличивается  
Д) сначала увеличивается, потом уменьшается  
Е) сначала уменьшается, потом увеличивается.

10. На рисунках ниже представлены графики зависимости удельного сопротивления от температуры. Какой график принадлежит полупроводнику?



11. Какой поток частиц создает электрический ток в полупроводниках? Укажите наиболее полный ответ.

А) дырки В) электроны и дырки С) электроны и ионы  
Д) атомы и электроны Е) ионы и дырки

12. Какой тип проводимости имеют собственные полупроводники?

А) не проводят электрический ток.  
В) равной электронной и дырочной проводимости.  
С) в основном к дырочной проводимости.

Д) в основном к электронной проводимости Е) НПО

14. Какое явление происходит, когда электрон и дырка встречаются в полупроводнике?

А) энергия поглощается В) образуется положительный ион.  
С) выделяется энергия Д) образуется отрицательный ион.  
Е) НПО

15. При наличии донорной смеси в полупроводниках, ... увеличивается. Измените точки в предложении.

А) количество дырок В) число свободных позитронов  
С) число свободных протонов Д) число свободных электронов  
Е) число свободных нейтронов

16. При акцепторной примеси в полупроводниках, ... увеличивается. Дополнильте пунктами данного предложения.

А) число свободных протонов В) число свободных электронов  
С) количество дырок Д) число свободных позитронов  
Е) число нейтронов

17. Если мы добавим фосфор в качестве примеси к германию, какой вид проводимости получается? Число валентных электронов в фосфоре составляет 5.

А) зависит от количества смеси В) р-типа  
С) n-типа Д) частные Е) температурно-зависимые

18. Как изменится электропроводность германия, если в четырехвалентный германия ввести трехвалентные атомы индия в соотношении, равном одному атому индия на миллион атомов германия?

А) увеличивается на  $10^{-6}$  часть первоначальной проводимости.  
В) уменьшается на  $10^{-6}$  начальной проводимости.  
С) значительно увеличивается и приобретает дырочную проводимость.  
Д) значительно увеличивается и приобретает электронную проводимость.  
Е) значительно увеличивается и электронная и дырочная проводимость примерно равны.

19. Какую функцию выполняет диод?

А) создает электрические колебания В) выпрямляет переменный ток.  
С) увеличивает силу тока Д) увеличивает напряжение.  
Е) преобразует постоянный ток в переменный.

20. Из чего состоит транзистор?

- А) от эмиттера, базы и коллектора      В) от катода и анода  
 С) от основания и эмиттера      Д) от анода, катода и сетки  
 Е) от излучателя и коллектора
21. Что за явления термозлектронное эмиссия?  
 А) излучение положительных ионов с поверхности нагретого твердого тела.  
 В) излучение электронов с поверхности нагретого твердого тела.  
 С) разделение атома на электрон и ион.  
 Д) распад атомов на электроны.  
 Е) распад атомного ядра.
22. От чего зависит количество электронов, испаряющихся с катода в единицу времени? Укажите наиболее полный ответ.  
 А) от материала катода, температуры.  
 В) на материал катода, напряжение.  
 С) от температуры, размеров поверхности, силы тока.  
 Д) от материала катода, размеров поверхности, температуры.  
 Е) По материалу анода, температуре.
23. Электрический ток в вакууме возникает из-за движения каких частиц?  
 А) протоны      В) ионы      С) нет тока в вакууме  
 Д) электроны      Е) произвольно заряженные частицы
24. В каких средах теплового воздействия тока не наблюдается:  
 1) в электролитах; 2) в газах; 3) в металлах;  
 4) в вакууме; 5) в полупроводниках?  
 А) 4      В) 1; 4; 5      С) 3; 4      Д) 1; 2      Е) 5.
25. Какие приборы станут основным элементом при преобразовании переменного тока в постоянный?  
 1) трансформатор; 2) полупроводниковый диод;  
 3) электронная лампа — диод; 4) транзистор.  
 А) 2, 3      В) 2, 4      С) 1, 2      Д) 1, 2, 3      Е) 2, 3, 4

### ЗАДАНИЯ ПО ГЛАВЕ III

1. Сколько граммов меди выделяется на катоде, если во время электролиза через раствор  $CuSO_4$  прошел  $100 \text{ Кл}$  электрический заряд? Электрохимический эквивалент меди равен  $0,329 \text{ мг/Кл}$ .

2. Сколько граммов меди можно получить методом электролиза из водного раствора хлорида меди ( $CuCl_2$ ) при силе тока  $1 \text{ А}$  за  $2 \text{ часа}$ ? Электрохимический эквивалент меди равен  $0,33 \text{ мг/Кл}$ .

3. Сколько граммов никеля выделяет ток  $10 \text{ А}$ , проходящий через раствор никелевой соли, за  $0,5 \text{ часа}$ ? Электрохимический эквивалент никеля составляет  $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл}$ .

4. Никелирование предмета заняло около  $50 \text{ минут}$ , в результате чего на предмет было помещено  $0,1 \text{ г}$  никеля ( $K_{Ni} = 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл}$ ). Сколько Ампер составляло сила тока при электролизе?

5. Определите массу ( $мг$ ) кислорода, выделяющегося при прохождении заряда  $16 \text{ Кл}$  из раствора серной кислоты ( $H_2SO_4$ ).  $N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ .

6. При прохождении тока в  $10 \text{ А}$  через раствор купороса меди за  $0,5 \text{ мин}$  выделилось  $0,1 \text{ г}$  меди. Каков электрохимический эквивалент меди ( $кг/Кл$ )?

7. Зная электрохимический эквивалент серебра ( $K_{Ag} = 1,12 \text{ мг/Кл}$ , найти электрохимический эквивалент золота ( $мг/Кл$ ). Относительные атомные массы серебра и золота примерно равны  $108$  и  $197$  соответственно.

8. Сколько граммов хлора выделяется на аноде за время электролиза соляной кислоты ( $HCl$ ), когда на катоде выделяется  $2 \text{ грамма}$  водорода? Электрохимический эквивалент водорода составляет  $1 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/Кл}$ , а хлора  $37 \cdot 10^{-8} \text{ кг/Кл}$ .

9. Молярная масса серебра составляет  $108 \text{ г/моль}$  при валентности  $1$  и электрохимическом эквиваленте  $1,08 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл}$ . Молярная масса золота составляет  $200 \text{ г/моль}$ . Каков электрохимический эквивалент золота ( $кг/Кл$ ), если валентность равна  $1$ ?

10. При прохождении тока  $2,5 \text{ А}$  через электролитическую ванну течение  $20 \text{ минут}$  выделилось  $1017 \text{ мг}$  двухвалентного металла. Какое значения имеет  $A$  число масса металла?

11. Какое масса ( $кг$ ) меди выделяющейся при электролизе. Если на нее затрачено  $10 \text{ кВт}\cdot\text{час}$  энергии? Напряжение в клеммах ванне  $10 \text{ В}$ . КПД прибора  $75\%$ , электрохимический эквивалент меди  $K = 3,310^{-7} \text{ кг/Кл}$ .

12. Через раствор серной кислоты в течение  $2 \text{ минут}$  пропустили ток  $1 \text{ А}$ . Какое объем выделяется при этом водорода? А кислорода? Считается, что эти газы находятся в нормальном состоянии.

13. Сколько энергии нужно затратить, чтобы получить  $1000 \text{ кг}$  алюминия? Напряжение на электродах печи  $10 \text{ В}$ , КПД прибора  $0,8$ .

14. Рассчитать электрохимический эквивалент серебра.

15. При электролизе раствора мелкого купороса вырабатывается работа равная  $4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ . Определите количество выделяемой меди, если напряжение между электродами ванны равно  $6 \text{ В}$ .

16. Во время никелирования детали в течение  $2 \text{ часов}$  через электролитическую ванну проходит ток  $2 \text{ А}$ . Электрохимический эквивалент никеля  $3 \cdot 10^{-7} \text{ кг/Кл}$ , плотность  $8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Внешняя грань детали  $0,4 \text{ м}^2$ . Определите толщину покрытия.

17. Найти сопротивление кремниевого диода в прямом и обратном направлениях для постоянного тока, если напряжение равно  $U_1 = 0,7 \text{ В}$ ,  $U_2 = -10 \text{ В}$  сила тока, проходящая через диод  $I_1 = 5,5 \text{ мА}$  и  $I_2 = 0,8 \text{ мА}$ .

18. Сила тока в эмиттерной цепи транзистора  $I_1 = 10 \text{ мА}$ . Сила тока в цепи базы равна  $I_2 = 500 \text{ мА}$ . Найти силу тока в коллекторной цепи.

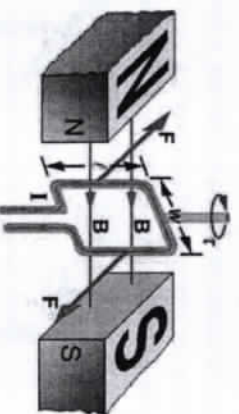
19. В усилителе, собранном по общей схеме базы, резистор  $R$  равен  $500 \text{ Ом}$ , напряжение на его зажимах равно  $4 \text{ В}$ , сила тока в цепи равна  $200 \text{ мкА}$ . Определите силу тока в цепи эмиттера.

20. В телевизорах напряжение электронно-лучевой трубки между анодом и катодом равно  $10 \text{ кВ}$ , а сила тока в анодной цепи равна  $300 \text{ мкА}$ . Определить энергию электронов и мощность поток электронов. Сколько электронов достигнет экрана за  $1 \text{ с}$ ?

21. Для сварки деталей электронным способом используется пучок электронов с энергией  $100 \text{ кэВ}$  и  $10^7 \text{ Вт}$  мощностью. Определить число электронов, проходящих через поперечную поверхность пучка за  $1 \text{ с}$ .

## ● ГЛАВА IV. МАГНЕТИЗМ

Обычные магнитные явления были известны еще до нашей эры. Но свидетельства о наличии связи между электрическим током и магнитными явлениями относятся к XVIII веку. Французский физик Араго в своей книге "Тром и молния" писал, что контакты на корабле, пораженном



молнией, куда попала молния вышли из строя, а стальные предметы в доме, такие как ножи, вилки, ложки, стали намагниченными. В предыдущей главе мы познакомились с тем, что электрическое поле создается электрическими зарядами, то есть источником электрического поля являются электрические заряды. Поскольку эта глава посвящена магнитным явлениям, очевидно, что мы можем дать четкий ответ, что магнитное поле также генерируется магнитными зарядами, как и в предыдущей главе. Но наблюдения и эксперименты, а также современные расчеты показали, что в природе нет "магнитных зарядов", подобных электрическим. Что же тогда является источником магнитного поля?

В этой главе мы познакомимся с источниками, образующими магнитное поле, магнитными явлениями, магнитными свойствами веществ, явлением электромагнитной индукции, законом электромагнитной индукции, а также с тем, как получается переменный ток.



### § 23. МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ. ОПЫТЫ, ДОКАЗЫВАЮЩИЕ СУЩЕСТВОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.

#### Опыт Эрстеда:

Магнитное действие электрического тока было обнаружено и исследовано экспериментально датским физиком Эрстедом в 1820 году. Это новшество Эрстеда стало одним из величайших импульсов в развитии физической науки. Это, в свою очередь, привело к тому, что впоследствии такие ученые, как био, Савар, Лаплас, Ампер, Фарадей, Максвелл, работали над электромагнетизмом и развили его. Давайте познакомимся с тем, как экспериментировал Эрстед.

Эрстед поместил магнитную стрелку вблизи проводника с током и изучил их взаимодействие. Когда ток не проходит через проводник, магнитная стрелка становится безразличным положением, т. е. Находится в том положении, в котором была повернута стрелка (рис.23.1-а). При прохождении тока через проводник магнитная стрелка принимает

фиксируемое положение. При попытке изменить положение магнитная стрелка снова возвращается в прежнее положение (рис.23.1-б). Теперь, когда ток, проходящий через проводник, меняет направление на противоположное, магнитная стрелка поворачивается на угол  $180^\circ$ , и полюса меняются местами. В результате находится новым положение (рис.23.1-в).



Рисунок 23.1

Пусть проводник с током расположен вертикально, а магнитные стрелки висят на параллельных нитях на равных расстояниях от этого провода. Первоначально, когда ток не проходит через проводник, магнитные стрелки остаются безразличными и не имеют порядка в своем расположении (рис.23.2-а). При прохождении тока через проводник магнитные стрелки принимают твердое положение, образуя круг. При попытке изменить положение магнитные стрелки вновь возвращаются в прежнее положение (рис.23.2-б). Теперь, когда ток, проходящий через проводник, меняет направление на противоположное, магнитные стрелки также поворачиваются на угол  $180^\circ$ , и полюсы становятся взаимозаменяемыми. На этом снова возникает фиксируемое положение, и они снова образуют круг (рис.23.2-с).

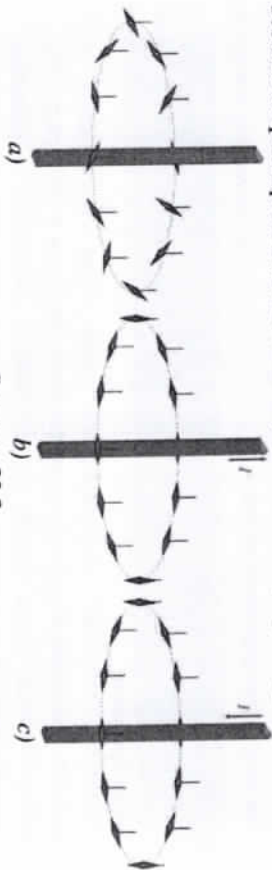


Рисунок 23.2

Из опыта Эрстеда видно, что магнитные стрелки взаимодействуют с проводниками только тогда, когда в нем протекает ток. Другими словами, магнитные стрелки взаимодействовали с магнитным полем, создаваемым током. Теперь, когда вместо магнитных стрелок с током в экспериментах Эрстеда были помещены другие стрелок — железные, алюминиевые или резиновые стрелок, они не взаимодействовали, независимо от того, насколько велико значение тока в проводнике. Отсюда следует вывод, что магнитная стрелка также имеет собственное магнитное поле вокруг себя. Это

означает, что магнитная стрелка взаимодействует с магнитным полем, которое она создает, в поле, которое создает токопроводящий проводник, то есть они взаимодействуют, когда магнитное поле встречает другое магнитное поле.

Опыт Эрстеда привел ученых к выводу, что вокруг проводника, через который проходит электрический ток, образуется магнитное поле. Это же поле, воздействуя на магнитную стрелку, изменяет ее положение. Другими словами, проводник с током поворачивает свободно вращающиеся магнитные стрелки, пока они не отклонятся в направлении своего поля

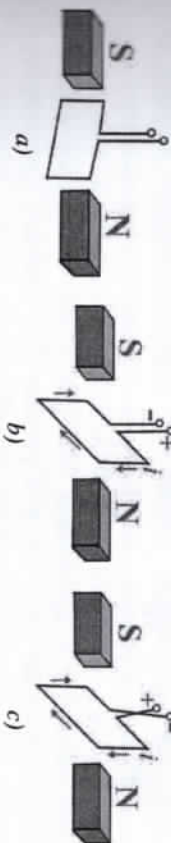


Рисунок 23.3

Мы видели на рисунках 23.1 и 23.2, что проводник с током неподвижен, а магнитные стрелки находятся свободно. Что если мы возьмем больший неподвижный магнит и поместим между его полюсами проводящую рамку со свободно вращающимся током?

— Сначала когда через проводящую рамку ток не проходит проводящая рамка остается безразличной, в каком бы положении она ни находилась (рис.23.3-а). При пропускании тока через проводник проводник занимает между полюсами положение, перпендикулярное магнитным линиям. При попытке изменить положение проводящую рамку снова возвращается в прежнее положение (рис.23.3-б). Теперь, когда ток, проходящий через проводник, меняет направление на противоположное, проводящая рамка также поворачивается на угол  $180^\circ$ . В результате получается новая положения (рис.23.3-с).

Отсюда следует вывод из всех вышеописанных опытов: как проводник тока и магнитная стрелка или магнит стремятся попасть в поле друг друга. Когда магнитная стрелка свободно показывает поле проводника с током, который он поворачивает. Когда проводящая рамка свободна, она поворачивается и показывает поле магнита.

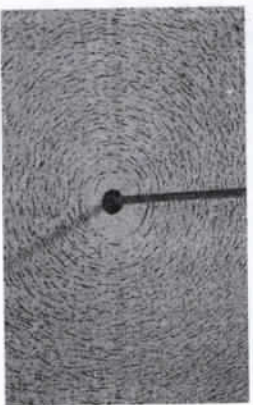
Только появление магнитного поля вокруг проводника при прохождении через него тока приводит к выводу, что источником магнитного поля является электрический ток (движущийся электрический заряд). Таким образом, открытие Эрстеда явилось одним из великих открытий в развитии физики, это открытие впоследствии стало основой для открытия важных открытий в области электромагнетизма



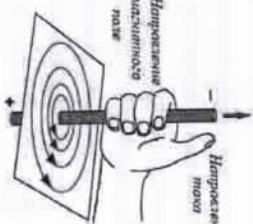
**Магнитные линии тока и магнитный стержень:**

Поскольку проводник с током создает магнитное поле, можно ли проверить на опыте, как оно выглядит? - Конечно, можно.

Берем картонную бумагу и держим ее в горизонтальном положении. В этот картон вставляем перпендикулярный проводник, который протыкает бумагу в вертикальном положении. На картонную бумагу насыпаем мелкую железную стружку (опилки). Железные опилки не образуют никакой формы, когда ток проходит через проводник. А при пропускании тока через проводник как показано на рисунке, принимает форму круга. 23.4-а коаксиальный (стрелочный). Потому что, если соединить эти окружности последовательно, образуются коаксиальные окружности. Отсюда следует, что магнитное поле прямого тока состоит из коаксиальных окружностей, центр которых находится в проводнике тока (рис.23.4-б). Как в эксперименте Эрстеда на рисунке 23.1, так и в рисунке 23.2 свободно вращающиеся магнитные стрелки создавали коаксиальное поле вокруг аналогичного прямого тока.



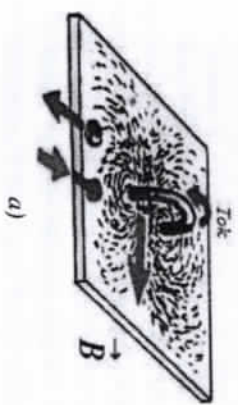
а)



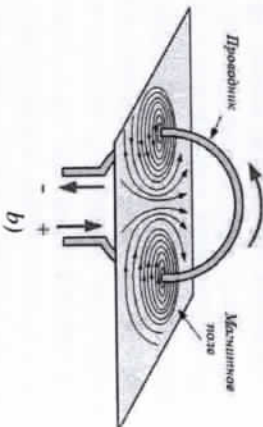
б)

Рисунок 23.4

Направление циркуляционного тока также можно определить по железным опилкам. Протыкаем картонную бумагу, пропускаем через нее токопроводящую жилу и посыпая сверху бумагу железными опилками. 23.5-а при пропускании тока через проводник образуются пейзаж на рисунке. В результате их наложения получаем изображение на рисунке 23.5-б.



а)



б)

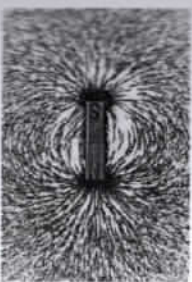
Рисунок 23.5

Магниты или магнитные стержни являются природным источником магнитов, которые встречаются в горных породах без сплава. Эти сплавы изготавливаются с приданием формы в зависимости от наших целей. Магнитные стержни изготавливают кольцеобразными, монетообразным, шпильчирескими, в виде призматического стержня, в виде магнитной стрелки или в форме подковы (рис.23.6). Давайте проверим, какой формы будет поле некоторых из них.

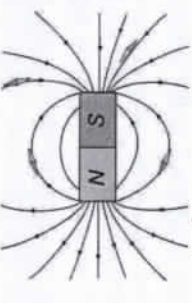


Рисунок 23.623.6

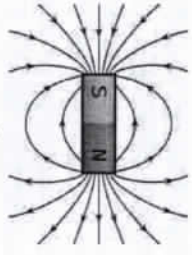
В результате эксперимента с железными опилками получаем изображение на рис.23.7-а. Если расположить в ближайших точках магнитного стержня свободно вращающиеся маленькие магнитные стрелки, то они займут положение на рис.23.7-б. 23.7-а,б,при последовательном соединении фигур на рисунке 23.7-в образуется изображение на рисунке.



а)



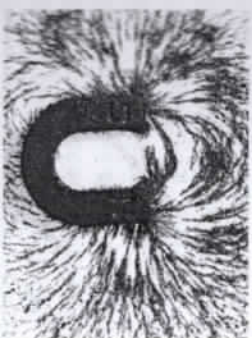
б)



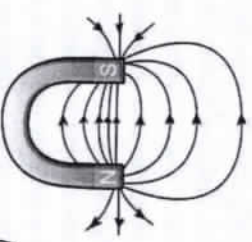
в)

Рисунок 23.7

Теперь давайте проверим поле магнита подковообразный с помощью железных опилок. Эти опилки образуют фигуру на рис.23.8-а, когда мы кладем подковообразный магнит на картонную бумагу и насыпаем по ней железные опилки. Если соединить эти фигуры последовательно, то получится рисунок на рис.23.8-б.



а)



б)

Рисунок 23.8



Теперь, когда мы помешаем свободно вращающуюся магнитную стрелку в магнитное поле Земли, полюс магнитной стрелки окажется северным, то есть указывает на север. Но этот полюс стрелки притягивается с северной стороны к южному полюсу Земли, полюс притягивается к себе, подставив стрелку под свое направление, корректируя стрелку в его направлении. Таким образом, в то время как магнитная стрелка указывала на географический север, на самом деле она указывала бы на Южный магнитный полюс. На рисунке 23.14 изображено магнитное поле Земли.

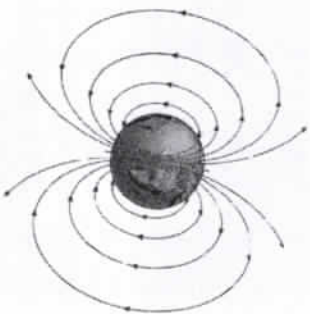


Рисунок 23.14

Магнитное поле вихревого тока мы проверили выше на рисунке 23.15. Теперь давайте проверим магнитное поле катушки. Напомним, что катушка (или соленоид) представляет собой набор проводочных обмоток проводника, намотанных на нить (рис.23-15). Соответственно, поскольку сумма циркулирующих токов образует катушку, следует сделать вывод, что магнитное поле, создаваемое катушкой тока, также должно быть таким же, как и поле вихревого тока.

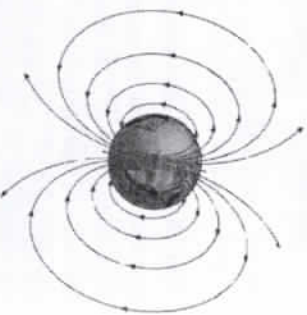


Рисунок 23.14

Это можно проверить с помощью опыта. Так же, как мы проверили поле магнитного стержня на рисунке 23.7, так и поле, образованное катушкой, можно проверить, поместив вокруг катушки с током маленькие магнитные стрелки, свободно вращающиеся вокруг нее (рис.23.16-а).



Рисунок 23.15

Затем, если эти стрелки последовательно провести по направлению отображения, получим изображение на рис.23.16-б. Из этих рисунков следует, что магнитные поля магнитной стрелки и катушки тока одинаковы. Соответственно, мы можем сказать, что сторона магнитных силовых линий, которая входит в катушку, может быть определена как полярная, а сторона, которая выходит из катушки, может быть определена как полярная.

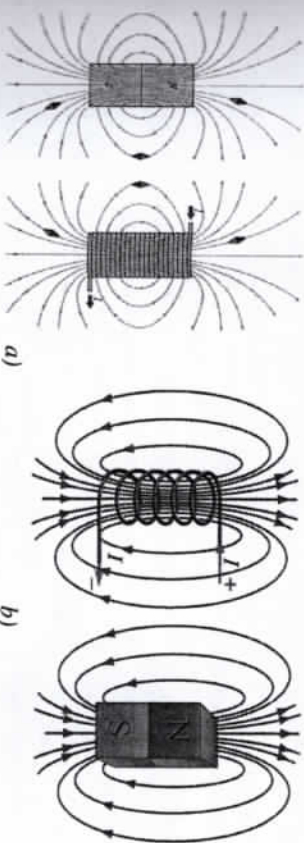


Рисунок 23.16

**Правило правой винта и правой руки:**

Опыт Эрстеда и опыты с крошечными железными опилками показывают, что магнитное поле проводника состоит из коаксиальных окружностей. Но так и осталось несжым, в каком направлении идет направление этих линии. Определение направления магнитного поля по правилу правой пармы, основанному на международном соглашении.

Правило правой пармы определяется для прямых и вихревых токов следующим образом (рис. 23.17):

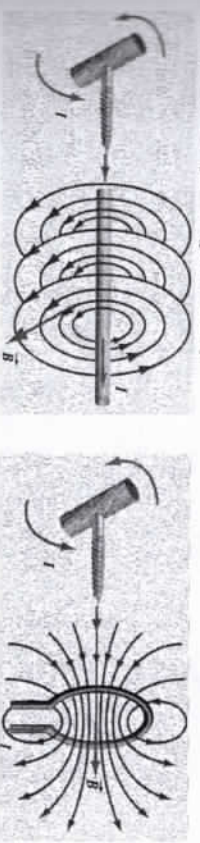


Рисунок 23.17

Если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то вращательное движение буравчика совпадает с направлением вектора магнитной индукции.

Правило буравчика также называют правилом правого винта.

Но в большинстве западных стран направление магнитного поля тока объясняется правилом правой руки, а не правилом правого винта.

Правило правой руки определяется для прямолинейных и вихревых токов следующим образом (рис. 23.18):

Если большой палец правой руки, повернутый к 90°, показывает направление тока, то направленные вращением буравчика такие же, как направление вектора магнитной индукции.

Если четыре пальца правой руки указывают направление ориентального тока, то большой палец, повернутый к  $90^\circ$ , указывает направление вектора магнитной индукции.

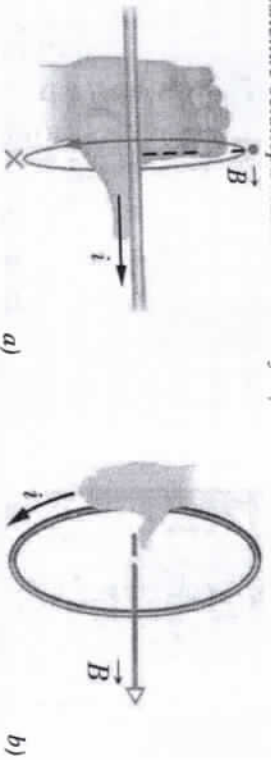


Рисунок 23.18

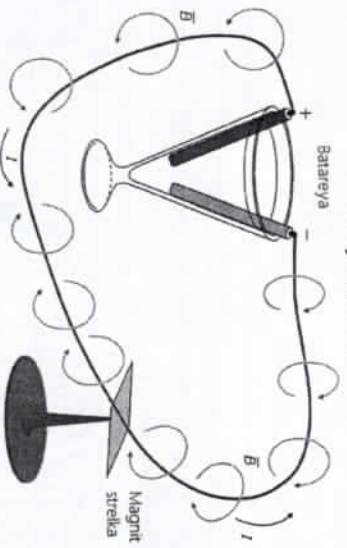


Рисунок 23.19

По сути, направление магнитного поля вихревого тока-это тот же случай, что и направление поля прямого тока. Хотя проводник с током имеет форму произвольной кривой, мы можем представить его как сумму очень большого числа правильных токов. В результате сложения полей, создаваемых этими элементарными токами, можно создать результирующее магнитное поле проводника с током произвольной формы, а также вихревым током. На рисунке 23.19 магнитное поле проводника с током произвольной формы изображено в виде поля элементарных прямых токов.

**Индукция магнитного поля:**

Электрическое поле создает неподвижный заряд, а магнитное поле создает движущийся заряд. Другими словами, когда электрическое поле смещается, создается магнитное поле. В отличие от электрического поля, магнитное поле является замкнутым полем, то есть магнитное поле не имеет ни конца, ни начала. В качестве количественной характеристики магнитного поля используется величина, называемая вектор магнитной индукцией. При

исследовании электрического поля мы будем использовать пробный заряд, а при исследовании магнитного поля-замкнутый контур с током.

Опыты показали, что крутящий момент зависит от силы тока, проходящего через раму, поверхности рамы и величины поля. Так как вращающий момент равен нулю, когда направление магнитного поля перпендикулярно плоскости рамки, а вращающий момент максимален, когда он параллелен.

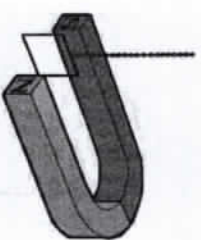


Рисунок 23.20

Так как максимальное значение крутящего момента, действующего на раму с током, пропорционально поверхности рамки и силе тока, проходящего через раму.

$$M_{max} = I \cdot S$$

Для рам с разной площадью и силой тока величина крутящего момента, действующего на раму, также различна, но оказывается, что отношение  $M_{max}$  к СИ является неизменной величиной для точки, в которую входит рама с током. Это соотношение называется индукцией магнитного поля в точке, в которую входит рама с током, силовая характеристика внешнего магнитного поле.

$$B = \frac{M_{max}}{I \cdot S} \quad (23.1)$$

Магнитная индукция поля в точке будет количественно равна крутящему моменту, возникающему при прохождении единичной силы тока через замкнутый контур с единичной площадью, расположенной перпендикулярно линии индукции в этой точке.

$$\frac{1 \text{ Н} \cdot \text{м}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}^2} = 1 \text{ Тл} \quad (23.2)$$

Единицей измерения магнитной индукции является Тл (Тесла), которая определяется как:

В системе единиц СИ за единицу магнитной индукции принята индукция такого магнитного поля, в котором на каждый метр длины проводника при силе тока  $I$  А действует максимальная сила Ампера  $I \cdot H$ . Эта единица называется тесла (Тл).

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \quad (23.3)$$

Тесла — очень крупная единица. Магнитное поле Земли приблизительно равно  $0.5 \cdot 10^{-4}$  Тл. Большой лабораторный электромагнит может создать поле не более 5 Тл.

Линии магнитной индукции всегда замкнуты, они нигде не пересекаются и не обрываются. Это означает, что магнитное поле не имеет источников — магнитных зарядов. Силовые поля, обладающие этим свойством, называются *вихревыми*. Картины магнитной индукции можно наблюдать с помощью мелких железных опилок, которые в магнитном поле намагничиваются и, подобно маленьким магнитным стрелкам, ориентируются вдоль линий индукции.

Магнитная индукция — векторная величина, направление которой определяется положительным нормальным направлением в равновесном состоянии рамки тока, введенного в исследуемую точку поля.

Напомним, что под положительной нормалью

понимается направление поступательного движения, достигнутое Пармой в результате скручивания правой рукоятки Пармы, расположенной перпендикулярно поверхности рамы, в направлении вращательного тока в раме (23.21-табл).

**Принципом суперпозиции полей:**

Вектор магнитной индукции — это векторная величина, имеющая величину и направление. Поэтому, чтобы добавить несколько векторов магнитной индукции, необходимо также учитывать их направление.

Если магнитное поле генерируется несколькими проводниками с током и постоянными магнитами, то для нахождения результирующего вектора магнитной индукции в точке пространства геометрически складываются векторы индукции поля, создаваемого каждым проводником с током и постоянными магнитами в этой точке.

Такой способ сложения полей называется принципом суперпозиции полей.

$$\vec{B}_{\text{рез}} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots + \vec{B}_n \quad (23.4)$$

Все вектор магнитной индукции суммируются, образуя один результирующий вектор магнитной индукции поля, который называется равнодействующим вектором.

При сложении полей складываются и их проекции на оси.

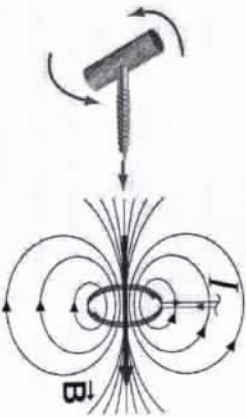
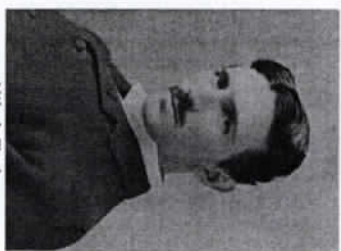


Рисунок 23.21

Никола Тесла, инженер-физик сербского происхождения, ученый, сделавший множество открытий в области электротехники и радиотехники, родился 1856 июля 10 года в городе Смилян, недалеко от Хорватии. Сам он родился в Австро-венгерской империи, достиг совершеннолетия в Австро-Венгрии и в 1891 году получил гражданство США, где и жил до конца своей жизни. Широко известен своими изобретениями в создании многофазных систем, синхронных и асинхронных двигателей, радиоаппаратов на переменном токе, что позволило перейти ко второй фазе промышленной революции. Тесла также известен как сторонник существования эфирной среды. В настоящее время единица измерения магнитной индукции носит название Тесла. Именно он изобрел высококачественный трансформатор. Он также изобрел, что ток с частотой выше 700 Гц может по невидимости тел. Умер 7 января 1945 года в Нью-Йорке.



Nikola Tesla (1856–1945)

Проекция с равнодействующий связаны следующим образом:

$$\begin{cases} B_x = B_{1x} + B_{2x} + B_{3x} + \dots + B_{nx} \\ B_y = B_{1y} + B_{2y} + B_{3y} + \dots + B_{ny} \\ B_z = B_{1z} + B_{2z} + B_{3z} + \dots + B_{nz} \end{cases} \quad (23.5)$$

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (23.6)$$

Направляющие косинусы (косинусы углов, образованного осями координат) равнодействующей имеет вид:

$$\cos \alpha = \frac{B_x}{B}, \quad \cos \beta = \frac{B_y}{B}, \quad \cos \gamma = \frac{B_z}{B} \quad (23.7)$$

Если обозначить ток, приходящим на В, А ток, отходящий от нас, то направления результирующего напряженности поля, создаваемого двумя равноотстоящими по величине проводниками с одинаковым расстоянием от проводников в точке А, будут следующими (рис. 23.22):

Если обозначить ток, приходящий к нам (•), и ток, отходящий от нас (×), то результирующее направления вектор магнитной индукции поля, создаваемые в точке А двумя равноотстоящими по величине проводниками с одинаковым расстоянием от проводников, будут следующими (23.22-табл):

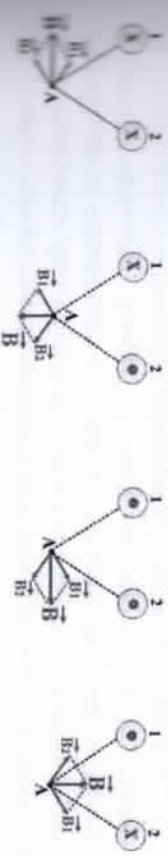


Рисунок 23.22

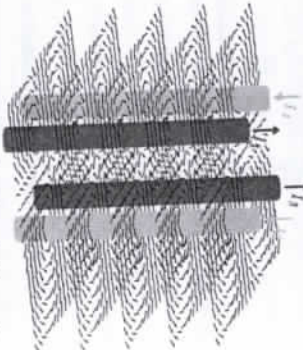
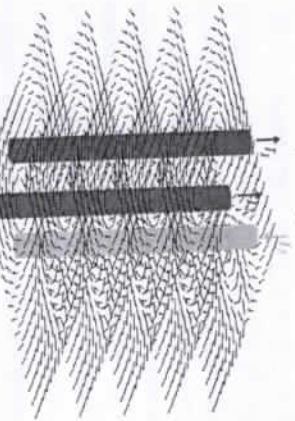
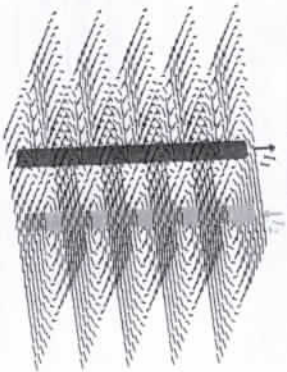
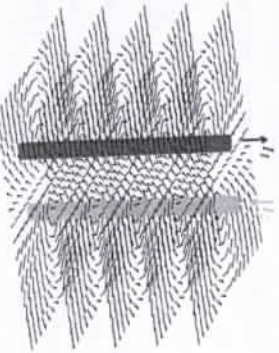
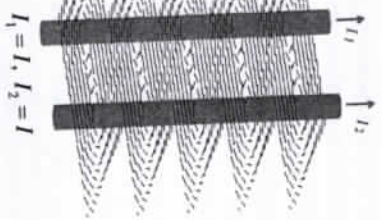
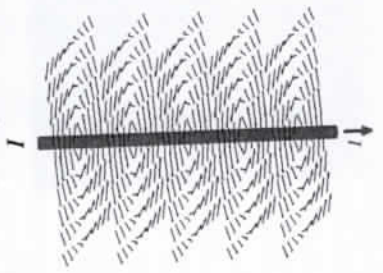


Рисунок 23.23

Опыты с железными опилками позволяют получить двумерное изображение магнитного поля магнита или проводника с током. Для получения трехмерного пространственного изображения железные опилки смешивают, погружая их в жидкость с достаточно высокой вязкостью. Когда магнитный стержень или проводник тока помещаются в эту жидкость, железные опилки вращаются и образуют определенные пространственные формы. Это также можно получить более простым способом, то есть с

помощью современных компьютерных программ. На рисунке 23.23 приведены примеры пространственных изображений магнитного поля, создаваемого системой проводников с током.

**Вопросы по теме:**

1. Опишите опыт, который Эрстед испытал. Сделайте выводы из результатов эксперимента?
2. Опишите опыт, проведенные с использованием железных опилок. Какой вывод делается в результате эксперимента о поле проводника и намагниченности?
3. Почему природные магнитные поля  $N$  и  $S$  обозначаются буквами "север" и "юг"?
4. Как формируется магнитное поле? Существует ли в природе "магнитный заряд"?
5. Как объясняются поля прямого и вихревого токов с помощью правила правой руки и правой руки?
6. Что такое единица индукции магнитного поля, что называется ее единицей?
7. Как складываются магнитные поля? Приведите примеры.

**Решение задач:**

1. Сколько Тесла будет магнитной индукции результирующего поля, если сложить два однородных магнитных поля с магнитной индукцией 0,3 Тл и 0,4 Тл и направить их перпендикулярно?  
 А) 0,7 В) 0,1 С) 0,2 Д) 0,5 Е) 0,6

Дано:

$B_1 = 0,3 \text{ Тл}$

$B_2 = 0,4 \text{ Тл}$

$\alpha = 90^\circ$

$B_n = ?$

Решение

Воспользуемся теоремой Пифагора.

$B_n = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}$

$B_n = \sqrt{(0,3)^2 + (0,4)^2} = 0,5 \text{ Тл}$

Ответ: Д) 0,5 Тл

**§ 24. СИЛА АМПЕРА И ЕГО НАПРАВЛЕНИЕ. ПРАВИЛО ЛЕВОЙ РУКИ. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТОКОВ.**

И предыдущем параграфе мы узнали, что магнитные стрелки и проводники с током взаимодействуют друг с другом через магнитные поля, которые они создают вокруг себя. При взаимодействии магнитной стрелки и проводники с током существует ли закон, количественно характеризующий этот взаимодействие, и правило, указывающее направление действия?

**Сила Ампера:**

Ампер был первым, кто исследовал влияние магнитного поля на проводник с током. При размещении горизонтального свободно проводящего тока между магнитными полюсами проводник с током притягивался к ближайшему полюсу (рис.24.1). При увеличении величины силы тока в проводнике притяжение между полюсами увеличилось. Следовательно, сила

взаимодействие пропорциональна силе тока. Даже при увеличении длины участка проводника с током, находящегося в магнитном поле, сила взаимодействия возрастает пропорционально. Кроме того, чем сильнее магнитное поле, тем больше сила взаимодействия.

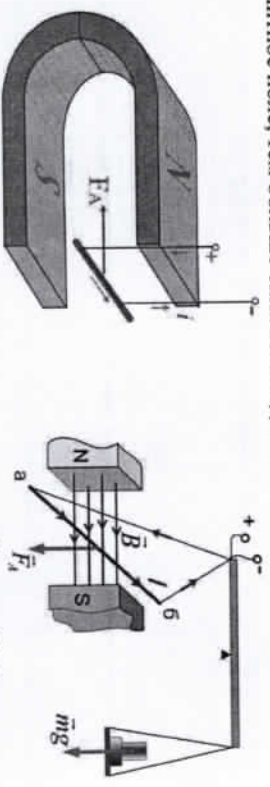


Рисунок 24.1

Подводя итог вышеизложенным пунктам, получается, что силу действия магнитного поля на проводник с током можно записать в виде:

$$F_A = B I l \sin \alpha = B I l \ell \quad [N] \quad (24.1)$$

Здесь:  $B$  – величина магнитного поля перпендикулярна проводнику тока,  $\alpha$  – угол между направлением магнитной индукции и направлением протекания тока.

Сила, действующая на проводник с током магнитным полем, называется силой Ампера.

Из приведенной выше формулы следует, что если  $\alpha = 90^\circ$ , то есть магнитная индукция перпендикулярна проводнику с током, то магнитное поле действует на проводник с наибольшей, максимальной силой.

$$F_{A \max} = B I l \quad (24.2)$$

Из этой формулы магнитная индукция имеет вид:

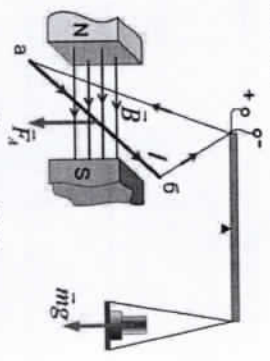
$$B = \frac{F_{A \max}}{I l} \quad (24.3)$$

Из приведенной выше формулы также можно дать другое определение магнитной индукции.

Магнитная индукция поля будет численно равна силе, действующей на единицу его длины при прохождении единичного тока через проводник, расположенный перпендикулярно линиям индукции в этой точке.

Единицей измерения магнитной индукции является Тл (Тесла), которая определяется как:

Рисунок 24.2



При введении в однородное магнитное поле в вертикальном положении проводника, имеющего длину  $l$  м и пропускающего ток  $I$  А, индукция этого поля будет равна  $1 \text{ Тл}$  при воздействии полем на этот проводник силы  $1 \text{ Н}$ .

$$\frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}} = 1 \text{ Тл} \quad (24.4)$$

Для количественной оценки величины силы Ампера проведем опыт, как на рисунке 24.2. Горизонтальный проводник размещаем вертикально на линиях магнитной индукции. Проводник подвешивается на одном плече весов с равными плечами и уравновешивается на другом плече грузом, равным массе проводника. При пропускании тока через проводник равновесие нарушается. А для восстановления равновесия на второй плече накладывается дополнительная нагрузка  $mg$ . Поскольку плечи равны, сила Ампера будет равна весу дополнительной нагрузки, т. е.  $F_A = mg$ .

Для количественного определения силы Ампера также можно провести эксперимент, как на рисунке 24.3. На проводник с током действуют силы тяжести  $mg$ , силы Ампера  $F_A$  и силы натяжения нити  $T$ . Исходя из формулы, основанной на теореме о трех равновесиях сил, известной из статики, сила Ампера равна  $mg$ . Определить значение силы Ампера можно, измерив угол и взвесив проводник с током.

Когда проводник с током, введенным в магнитное поле, перемещается по полю, то выполняется механическая работа. Если ток перемещать проводник силой Ампера на некоторое расстояние  $d$ , образуя произвольный угол  $\varphi$ , то выполняемая работа будет выглядеть следующим выражением:

$$A = \vec{F}_A \cdot \vec{d} = F_A d \cos \varphi = (B I l \sin \alpha) \cdot (d \cos \varphi) \quad (24.5)$$

Если магнитное поле перемещается в направлении тока ( $\alpha = 0$ ) или если проводник перемещается в направлении тока ( $\varphi = \pi/2$ ), работа выполненная равна нулю.

Если магнитное поле перпендикулярно проводнику ( $\alpha = \pi/2$ ) и проводник также перемещается в направлении силы Ампера ( $\varphi = 0$ ), работа выполненная будет максимальной, и она имеет следующее выражение:

$$A_{\max} = B I l d \quad (24.6)$$

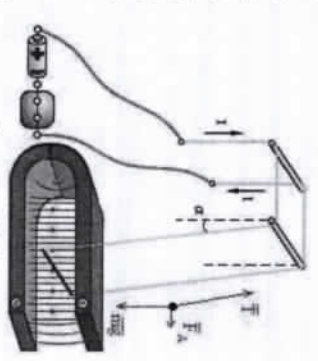


Рисунок 24.3

В предыдущих главах мы видели, что электрическое поле и сила Кулона параллельны. Но направление силы Ампера не совпадает с направлением магнитного поля. Формула силы, с которой магнитное поле воздействует на проводник с током, найденная выше, поможет определить только величину силы в Ампера.

**Правило левой руки:**

Поскольку сила Ампера является вектором, она имеет направление. Направление силы Ампера определяется по правилу левой руки (рис.24.4-а,б).



Рисунок 24.4

**Правило левой руки определяется так:**

Если расположить левую руку так, чтобы пальцы указывали в сторону, а вытянутые пальцы были направлены вдоль направления тока, то отведенный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник с током.

**Взаимодействие параллельных токов:**

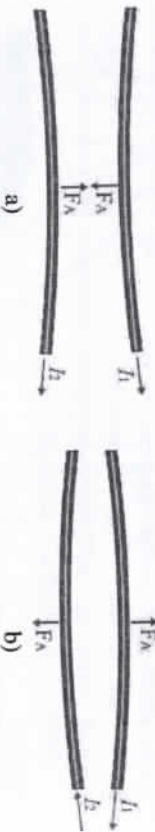


Рисунок 24.5

**Сила Ампера не только**

действует, когда проводник тока находится между полюсами магнита, но и сила Ампера действует на этот проводник, когда проводник с током находится в любое магнитное поле. В частности, они также вступают во взаимодействие, когда проводник с током вводится в поле другого проводника с током. Как взаимодействуют параллельные токи, известно из

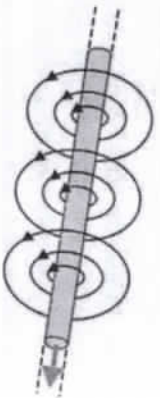


Рисунок 24.6

экспериментов. Если в параллельных проводниках токи направлены в одном направлении, проводники притягиваются. Если в параллельных проводниках токи направлены в противоположные стороны, проводники отталкиваются (рис.24.5).

Причины притяжения и отталкивания, можно легко объяснить с помощью правила левой руки. Как известно, проводник прямого тока создает вокруг себя магнитное поле в виде коаксиальных окружностей (рис.24.6). Если расстояние между проводниками равно r, площадь, образованная одним из проводников, будет перпендикулярна второму по окружности с радиусом r, а другой будет перпендикулярен первому по окружности с таким же радиусом r. С помощью левой руки мы можем легко определить направление силы Ампера (рис.24.7).

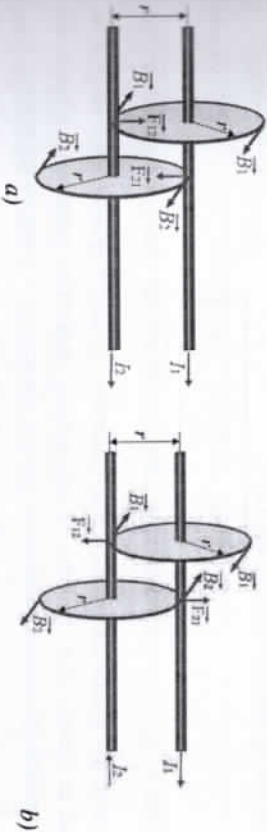


Рисунок 24.7

Количественное измерение силы взаимодействия параллельных токов было найдено опытным путем. По результатам эксперимента сила взаимодействия параллельных токов будет пропорциональна силе тока в каждом проводнике  $F_A \sim I_1 \cdot I_2$ . Отсюда следует вывод, что сила взаимодействия токов прямо пропорциональна произведению сил тока  $F_A \sim I_1 \cdot I_2$ . Из дальнейших опытов было установлено, что сила взаимодействия прямо пропорциональна длине участка проводников, взаимодействующих друг с другом  $F_A \sim \ell$ . Чем дальше расположены проводники друг от друга, тем с меньшей силой они взаимодействуют, т. е.  $F_A \sim 1/r$ .

Таким образом, для силы взаимодействия параллельных токов

$$F_A \sim \frac{I_1 I_2 \ell}{r}$$

Переход от пропорциональности к равенству осуществляется введением коэффициента.

$$F = k \frac{I_1 I_2 \ell}{r} \quad [H] \quad (24.7)$$



Здесь:  $k = 2 \cdot 10^{-7} [N / A^2]$  – коэффициент пропорциональности.

Определим коэффициент пропорциональности следующим образом:

В вакууме два параллельных проводника, расположенных на расстоянии  $l$  м друг от друга и через каждый из которых проходит ток  $I$ , на протяжении  $l$  м взаимодействуют друг с другом с силой  $2 \cdot 10^{-7} N$ .

Силу взаимодействия параллельных токов можно записать через магнитную постоянную следующим образом:

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \ell}{2\pi r} \quad [N] \quad (24.8)$$

Здесь:  $\mu_0 = 2\pi k = 4\pi \cdot 10^{-7} [N / A^2]$  – магнитная постоянная.

Если в среде находится параллельные токи, то приведенная выше формула принимает следующий вид:

$$F_M = \frac{\mu \mu_0 I_1 I_2 \ell}{2\pi r} \quad [N] \quad (24.9)$$

Здесь:  $\mu_0 = \frac{F_M}{I_1 I_2 \ell}$  – магнитная проницаемость среды, которая показывает, во сколько раз увеличивается сила воздействия среды по сравнению с вакуумом из-за ее магнитных свойств. О магнитных свойствах различных сред и их магнитной проницаемости мы подробно объясняем в следующих темах.

Вопросы по теме:

1. Опишите закон Ампера и запишите его математическое выражение.
2. Опишите правило левой руки. Укажите направления силы тока, магнитной индукции и силы Ампера на основе правила левой руки и поместите их на оси координат
3. Объясните притяжение параллельных токов в одном направлении на основании правила левой руки.
4. Объясните отталкивание параллельных токов в противоположных направлениях на основании правила левой руки.
5. Запишите выражение, определяющее силу взаимодействия параллельных токов.
6. Опишите числовые значения и единицы измерения к коэффициенту пропорциональности и  $\mu$  магнитной постоянной. Запишите связь между ними.

**Решение задачи:**

1. В однородное магнитное поле с индукцией  $0,3 \text{ Тл}$  был введен проводник длиной  $0,6 \text{ м}$  с током  $10 \text{ А}$ . Определить наибольшую и наименьшую силы, которые могут быть приложены магнитным полем к этому проводнику (Н).

А) 20; 10 В) 18; 9 С) 0,9; 0,3 Д) 10; 0 Е) 1,8; 0.

**Дано**

$B = 0,3 \text{ Тл}$   
 $l = 0,6 \text{ м}$   
 $I = 10 \text{ А}$

**Решение**

1)  $F_{\min} = |B S \sin \alpha| \Rightarrow \sin \alpha = 0 \quad F_{\min} = 0$

2)  $F_{\max} = |B S \sin \alpha| \Rightarrow \sin \alpha = 1 \quad F_{\max} = 1,8 \text{ Н}$

Описание: мы оцениваем наименьшие и наибольшие значения в соответствии со значением приема  $\sin \alpha$  в выражении силы Ампера

Ответ: Е)

$F_{\min} = ? \quad F_{\max} = ?$

2. На проводник длиной  $50 \text{ см}$  током  $2 \text{ А}$  действует сила  $0,1 \text{ Н}$  в однородном магнитном поле с индукцией  $0,05 \text{ Тл}$ . Найти косинус угла между проводником и вектором магнитной индукции.

**Дано**

$l = 2 \text{ А}$   
 $l = 0,5 \text{ м}$   
 $F = 0,1 \text{ Н}$   
 $\cos \alpha = ?$

**Решение**

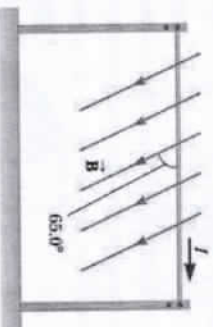
1)  $F = |B S \sin \alpha$

2)  $\sin \alpha = F / |B l| = 0,5$

3)  $\cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} = \sqrt{3} / 2$

Ответ:  $\cos \alpha = \sqrt{3} / 2$

3. Горизонтально расположена высоковольтная линия электропередачи длиной  $58 \text{ м}$  несет на север ток  $2,2 \text{ кА}$ , как на рисунке. Значение индукции магнитного поля на этой широте земного шара равно  $5 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$ , направление которого составляет с севером  $65^\circ$  угол. Определите величину и направление силы тока, действующей на линию электропередачи.



**Дано**

$l = 58 \text{ м}$   
 $I = 2200 \text{ А}$   
 $\alpha = 65^\circ$   
 $B = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$   
 $F_A = ?$

**Решение**

Рассчитаем силу Ампера по формуле определения.

$$F_A = B I l \sin \alpha = (5 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}) \cdot (2200 \text{ А}) \cdot (58 \text{ м}) \cdot \sin 65^\circ = 5,44 \text{ Н}$$

Следовательно, поскольку на проводник с током

действует сила Ампера, равная  $5,44 \text{ Н}$ , а направление этой силы, исходя из правила левой руки, от плоскости

изображения направляется к нам.

Ответ:  $F_A = 5,44 \text{ Н}$ ; в сторону читателя

**§ 25. МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ. ВРАЩАТЕЛЬНЫЙ МОМЕНТ И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ КОНТУРА ТОКА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ. РАБОТА. ВЫПОЛНЯЕМАЯ ПРИ ВРАЩАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ С ТОКОМ.**

**Контуры тока, введенного в магнитное поле:**

Мы использовали точечный "пробный заряд" при проверке электрического поля. При проверке аналогичного магнитного поля мы используем "магнитную стрелку" (маленький постоянный магнит в форме стрелки) или "пробный контур" (замкнутый контур с небольшим током). При этом "пробный контур" выбирается таким образом, чтобы его поверхность была как можно меньше, чтобы он не влиял на свойства поля в данной точке. Поверхность тестового контура, кроме того, обязательно (треугольник, прямоугольник, круг и т.д.) по форме, количество обертываний также может быть необязательным. Пространственное положение "испытательного контура" определяется направлением нормали поверхности. Нормаль поверхности - это положительный единичный вектор, проведенный вертикально к поверхности. а направление нормали определяется с помощью правила правой Пармы в зависимости от направления тока в контуре (рис.25.1-а).

Направление вращательного движения пары правой ладони совпадает с направлением тока в контуре, тогда как направление его поступательного движения указывает направление положительной нормали, перпендикулярной на контурную фронт.

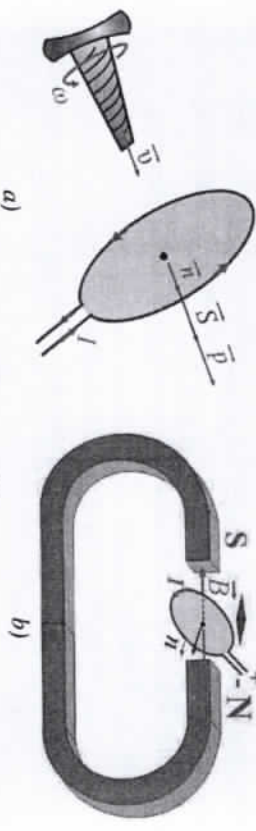


Рисунок 25.1

В предыдущих темах мы давали аналогичное определение магнитного поля вихревого тока. Отсюда следует, что направление контурной нормы совпадает с направлением магнитного поля в центре контура. Умножение контурной поверхности на нормаль поверхности дает вектор поверхности (рис.25.1-а).

$$\vec{S} = S \cdot \vec{n} \quad (25.1)$$

**Магнитный момент:**

"Пробный контур" характеризуется векторной величиной, называемой магнитным моментом контура. *Магнитный момент контура является векторной величиной, равную произведению силы тока, проходящего через контур, на вектор поверхности.*

$$\vec{P}_\mu = I \cdot \vec{S} = I \cdot S \cdot \vec{n}, \quad P_\mu = I \cdot S \quad (25.2)$$

Отсюда следует, что нормаль поверхности, вектор поверхности и вектор магнитного момента являются направленными (рис.25.8). Величина магнитного момента имеет огромное значение в атомной, ядерной и физике элементарных частиц, а также в квантовой механике. В нем участвуют чистые и орбитальные магнитные моменты каждой частицы. При введении контура во внешнее магнитное поле на него обязательно воздействует магнитное полебудет. При этом магнитный момент контура также называют магнитным диполем. На рисунке 25.2 изображено поле магнитного диполя.

**Вращающий момент:**

Возьмем контур тока ABCD прямоугольной формы, вращающийся вокруг оси OO<sub>1</sub>, перпендикулярной линиям магнитного поля (рис.25.3-а). Это означает, что длина контура равна AB=CD=l, а ширина BC=DA=d. Поскольку все четыре стороны этого контура являются проводниками с током, введенным в магнитное поле, на каждую из них действуют силы Ампера

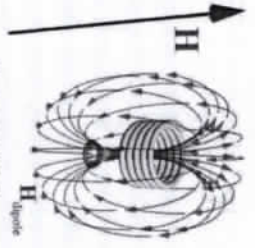


Рисунок 25.2

Ампера  $F_{AB} = F_{CD} = BIl$ , а на стороны BC и DA действуют силы Ампера  $F_{BC} = F_{DA} = Bld$ . Силы Ампера, действующие на стороны BC и DA, всегда лежат в одной плоскости, соответственно равны и направлены в противоположные стороны, плечо между этими силами всегда равно нулю. Следовательно, эти силы не образуют парных сил (вращающий момент), и пренебрежимо движение не возникает под действием этих сил. А силы Ампера, действующие на стороны AB и CD контура, образуют парные силы (вращающий момент). Поэтому что расстояния между этими силами лежат на параллельных прямых, которые равны  $x=d \sin \alpha$ , а их направления противоположны. Поэтому под действием этой парных сил возникает вращающий момент, стремящийся повернуть проводящую раму вокруг оси OO<sub>1</sub> (рис.25.3-б).

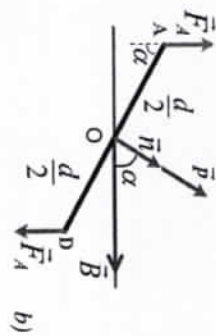
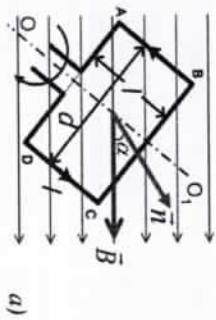


Рисунок 25.3

Из раздела статике механики известно, что парная сила и плечевое умножение между этими силами дают вращающий момент. При этом

$$M = F_A \cdot x = B I l d \sin \alpha = B I S \sin \alpha = B P_\mu \sin \alpha$$

Следовательно, вращающий момент, возникающий в замкнутом контуре, введенном в магнитное поле, определяется по формуле:

$$M = B I S \sin \alpha = B P_\mu \sin \alpha \quad (25.3)$$

Записав приведенную выше формулу в векторном виде, получим:

$$\vec{M} = \vec{r}_\mu \times \vec{B} = I (\vec{s} \times \vec{B}) = I S (\vec{n} \times \vec{B}) \quad (25.4)$$

Следовательно, вектор вращающего момента будет равен векторному умножению вектора магнитного момента на вектор магнитной индукции. На приведенном выше рисунке вектор вращающего момента направлен вдоль оси  $OO_1$ , от точки  $O_1$  к точке  $O$ , и вращательное движение происходит против часовой стрелки, если смотреть на конец вектора вращающего момента.

Когда плоскость контура перпендикулярна линиям магнитной индукции ( $\alpha=0$ ), значение вращающего момента равно нулю. И наоборот, когда плоскость контура параллельна линиям магнитной индукции ( $\alpha=\pi/2$ ), значение вращающего момента будет максимальным. Максимальный вращающий момент равен:

$$M_{\max} = B I S = B P_\mu \quad (25.5)$$

Замкнутой контур, введенный в магнитное поле, магнитное поле широко используется в жизни и технике

Введенный в магнитное поле, образованного магнитного поля в закрытом контуре широко используется в технике. В частности, именно на этом основан принцип работы электродвигателей всех типов.

**Работа, выполняемая при повороте контура, потенциальная энергия контура:**

Из раздела динамики механики нам известно, что потенциальная энергия- это энергии действия. Любые взаимодействующие тела будут обладать способностью выполнять работу, а также потенциальной энергией.

Вычислим работу, выполняемую вращающим моментом, влияющим на испытываемый контур, введенный в магнитное поле.

Из механики твердых тел известно, что поворотный момент и угол поворота дают работу, выполняемую при повороте поверхности, ограниченной связным графиком.

$$A = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} M(\varphi) d\varphi$$

Соответственно, работа магнитного поля при вращении контура равна:

$$A_{\text{маг}} = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} M(\varphi) d\varphi = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} B I S \sin \varphi d\varphi = B I S (-\cos \varphi) \Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2} = -B I S \cos \alpha_2 - (-B I S \cos \alpha_1) =$$

$$= W_{r_1} - W_{r_2} = B I S (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) = B P_\mu (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)$$

Здесь мы определили  $W_{r_1} = -B I S \cos \alpha$  как потенциальную энергию контура тока в магнитном поле.

Следовательно, работа, выполняемая магнитным полем при вращении контура равна:

$$A_{\text{маг}} = W_{r_1} - W_{r_2} = B I S (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) = B P (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (25.6)$$

Из механики мы знаем, что внутренние и внешние силы стремятся переместить объект в противоположные стороны, и работа, выполняемая этими силами, также связана взаимным знаком (-). Точно так же работа, выполняемая внешними силами, связана с работой, выполняемой магнитным полем, с помощью знака (-), т. е. будет. В соответствии с этим можно определить выполняемую работу, при повороте контура, противоположного направления поле  $A_{\text{внеш}} = -A_{\text{маг}}$ .

Следовательно, работа, выполняемая внешней силой при повороте контура тока против магнитного поля, будет следующей:

$$A_{\text{внеш}} = W_{r_2} - W_{r_1} = B I S (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) = B P (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \quad (25.6)$$

Потенциальная энергия замкнутого контура с током, введенным в магнитное поле, будет выглядеть следующим образом:

$$W_r = -B I S \cos \alpha = -\vec{B} \cdot \vec{r}_\mu \quad (25.7)$$

Итак, из приведенной выше формулы можно сделать вывод, что:

- 1) если плоскость контура с током параллельна линиям магнитной индукции ( $\alpha=\pi/2$ ), потенциальная энергия контура достигает своего максимального значения  $W_{r,\max} = 0$ ;
- 2) если плоскость контура с током перпендикулярна линиям магнитной индукции ( $\alpha=0$ ), потенциальная энергия контура достигает своего минимального значения  $W_{r,\min} = -B I S = -B P$ .

1. Что такое пробный контур? Как определяется магнитный момент испытываемого контура? Каков его направление?
2. Опишите условия существования магнитного момента.
3. Запишите формулы вращающего момента в векторном и скалярном виде, действующего на контур с током, введенным в магнитное поле.
4. Запишите работу, выполненную (магнитным полем или внешней силой) при вращательном контуре с током, введенным в магнитное поле.
5. Запишите потенциальную энергию рамки с током, введенным в магнитное поле.

**Решение задач:**

1. Проволока радиусом 5 см находится в однородном магнитном поле с индукцией катушки 0,2 Тл. Какой максимальный момент силы действует на него магнитным полем (Н·м), если через кольцо проходит ток 2 А?

А) 6,28·10<sup>-6</sup> В) 3,14·10<sup>-3</sup> С) 31,4 Д) 3,14 Е) 3,14·10<sup>-6</sup>

**Дано**  
 $R=5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$   
 $V=0,2 \text{ Тл}$   
 $I=2 \text{ А}$   
 $M=?$

**Решение**  
 1)  $F=BII$   
 2)  $l=2\pi r$ ,  $S=rR^2$   
 3)  $M=IBS=rI\beta R^2=r \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}$

**Ответ:** В)

2. Однородное магнитное поле с индукцией 4/π Тл имеет обмотку диаметром 10 см и пропускает ток 1 А. Сколько миллижоул выделенная работа, чтобы повернуть на 90° обмотку, плоскость которой параллельна вектору магнитной индукции, так, чтобы ее плоскость была перпендикулярна вектору магнитной индукции?

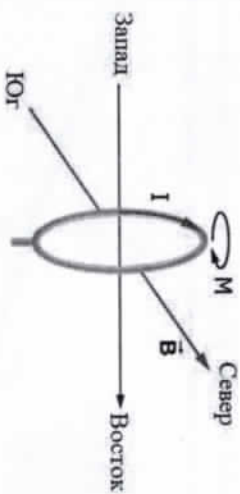
**Дано**  
 $I=1 \text{ А}$   
 $\alpha=90^\circ$   
 $d=0,1 \text{ м}$   
 $V=\frac{4}{\pi} \text{ Тл}$   
 $\alpha=?$

**Решение**  
 1)  $A=\Delta W$   
 2)  $\Delta W=|W_2-W_1|$   
 3)  $W_2=0$   
 4)  $A=W_1=\frac{LI^2}{2}$   
 5)  $LI=BS$

6)  $A=\frac{BSI}{2}=\frac{\frac{4 \cdot \pi d^2}{2} \cdot I}{2}=\frac{d^2 I}{2}=\frac{0,01^2 \cdot 1}{2}=0,005 \text{ Дж}$

**Ответ:** 5 мДж

3. Ось вращательного вращательного контура радиусом 50 см с 200 витками направлена с запада на восток, как на рисунке. По контуру ток 100 А течет по часовой стрелке, если смотреть с востока. Естественное магнитное поле Земли, равное 3·10<sup>-5</sup> Тл, направлено на север параллельно поверхности земли. Какое значение вращательного момента оказывает воздействие на контур? В какую сторону направлен этот момент?



**Дано**  
 $N=200$   
 $r=50 \text{ см}$   
 $V=3 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$   
 $I=100 \text{ А}$   
 $M=?$

**Решение**  
 Сначала определим магнитный момент контура тока.  
 $p_m = IS = \pi r^2 I = 3,14 \cdot (0,5 \text{ м})^2 \cdot 100 \text{ А} = 78,5 \text{ А} \cdot \text{м}^2$   
 Этот магнитный момент направлен с востока на запад.  
 Направление вращающего момента  
 $M = p_m \times B$

векторное умножение в основном вниз, а значение равно:  
 $M = p_m B \sin(\vec{p} \wedge \vec{B}) = (78,5 \text{ А} \cdot \text{м}^2) \cdot (3 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}) \cdot \sin 90^\circ = 2,355 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м} = 2,355 \text{ мН}$   
**Ответ:**  $M=2,355 \text{ мН}$ ; направлен в вниз.

**§ 26. ЗАКОН БИО-САВАРА-ЛАПЛАСА И ВЫТЕКАЮЩИЕ ИЗ НЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ.**

Мы выяснили, что магнитное поле создают проводники с током. Внутри проводников движутся свободные электроны, несущие заряды. Следовательно, можно сказать, что магнитное поле создается движущейся заряженной частью или что магнитное поле создается при перемещении электрического поля. Итак, как вычисляется магнитное поле проводниках с током?

**Определение закона Био-Савара-Лапласа:**

Вычислением магнитного поля проводники с током занимались Био, Савар и Лаплас. Био и Савар в результате исследования магнитных полей вокруг проводники с током различной формы пришли к выводу, что магнитная индукция прямо пропорциональна силе тока и обратно

пропорциональна расстоянию до проводника с током. Лаплас предложил формулу, позволяющую определить магнитную индукцию для точек вокруг проводника с током произвольной формы.

Лаплас, используя принцип суперпозиции полей, пришел к выводу: так как результирующее поле, образуемое несколькими токами, будет равно геометрической сумме полей, образуемых каждым током, то площадь проводника с током произвольной формы также должна быть равна геометрической сумме полей, образованных каждым участком, когда этот проводник разделен на более мелкие части. Лаплас первым ввел понятие элемент тока.

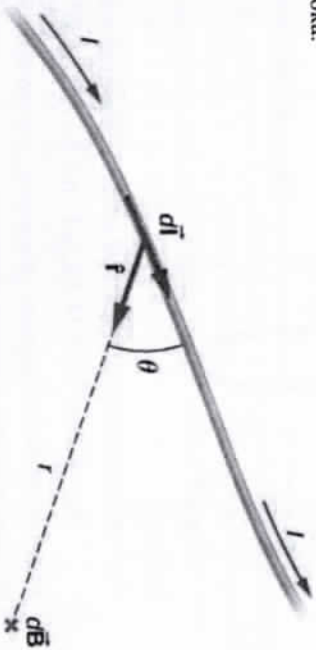


Рисунок 26.1

Проводник произвольной формы может быть разбит на элементарные  $dl$  сечения. Элементарная часть  $dl$ , умноженная на силу тока, т. е. векторную величину, направленную в сторону протекания тока, называется элементом тока (рис.26.1).

Ученые открыли следующую формулу, показывающую вектор магнитной индукции, создаваемый элементом тока Био-Савара-Лапласа (рис. 26.1):

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I [d\vec{\ell} \times \vec{r}]}{r^3} \quad (26.1)$$

Направление магнитного поля  $d\vec{B}$  совпадает с направлением векторного произведения  $d\vec{\ell} \times \vec{r}$ . Значения  $d\vec{\ell} \times \vec{r}$  векторного произведения  $d\vec{\ell}$  и  $\vec{r}$  будет равна площади параллелограмма, построенного на векторах  $|d\vec{\ell} \times \vec{r}| = dlr \sin \alpha$ .

Приведем три определения для определения направления  $d\vec{B}$  магнитного поля (рис. 26.2):

Определение 1 (определение векторного произведения): вектор  $d\vec{B}$  направлен так, что вращательное движение должно выглядеть против часовой стрелки, если смотреть с конца этого вектора  $d\vec{\ell}$ , чтобы вектор  $\vec{r}$  пересекся с вектором кратчайшим путем (рис.26.2-а).

Определение 2 (правило правой ладони): если поступательное движение правой ладони указывает направление вектора  $d\vec{\ell}$ , то направление вращения буравчика указывает направление вектора  $d\vec{B}$  (рис.26.2-б).

Определение 3 (правило правой руки): если большой палец нашей правой руки, повернутый к  $90^\circ$  показывает правильное направление тока, то направление вращения буравчика такое же, как направление вектора магнитной индукции (рис.26.2-в).

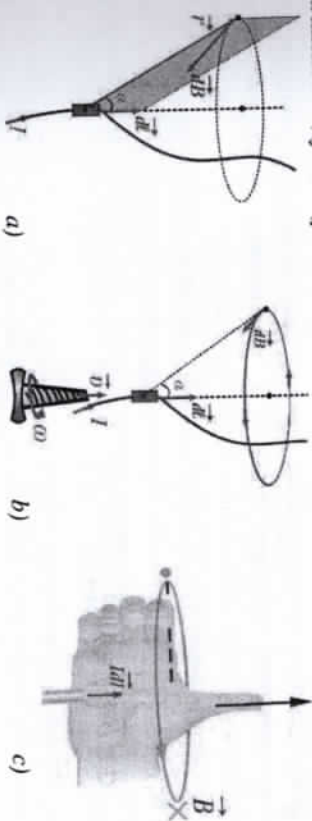


Рисунок 26.2

Таким образом, направление  $d\vec{B}$  вектора  $d\vec{\ell}$  и  $\vec{r}$  перпендикуляр к плоскости, проходящей через векторы, т. е.  $d\vec{B} \perp d\vec{\ell}$ ,  $d\vec{B} \perp \vec{r}$ .

По закону Био-Савара-Лапласа индукция магнитного поля, создаваемого токовым элементом, численно находится следующим образом:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\ell \sin \alpha}{r^2} \quad (26.2)$$

Поле проводника с током произвольной формы будет равна геометрической сумме полей, образованных элементами тока.

$$\vec{B} = \int d\vec{B} \quad (26.3)$$

Магнитное поле точечного заряда при прямолинейном равномерном

движении:

Известно, что перемещения заряженных частиц в одну сторону порождает ток. Следовательно, любой элемент тока также содержит ток несущих определенное количество заряженных частиц. Суммарный заряд этой заряженной частицы можно обозначить как  $q = Ne$ , ток, создаваемый ее движением  $I = \frac{q}{dt} = \frac{Ne}{dt}$ , а элемент тока — обозначим следующим виде

$$I d\vec{\ell} = \frac{q}{dt} d\vec{\ell} = q \vec{v}$$

Если вместо элемента тока взять движущийся точечный заряд, то его индукция магнитного поля будет следующей (рис. 26.1):

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \beta \sin \alpha}{r^2} \quad (26.4)$$

**Магнитное поле прямого тока:**

Мы можем сначала рассчитать магнитное поле прямого тока для конечной длины, а затем применить его для бесконечной длины.

Дан проводник прямого тока с ограничением на длину  $l$ , пусть задана магнитная индукция в точке  $A$ , находящейся на произвольном расстоянии от этого проводника. Пусть проводник из точки  $A$  виден при взгляде на его концы  $\alpha$  и  $\beta$  углами (рис. 24.2-а). Через точку  $A$  проводим ось  $Oy$ , а через проводник-ось  $Ox$ . Произвольно от начала координат  $d\ell = dx$  на расстоянии  $l d\ell = Idx$  получаем элемент тока. Это магнитная индукция элемента с током в точке  $A$ .

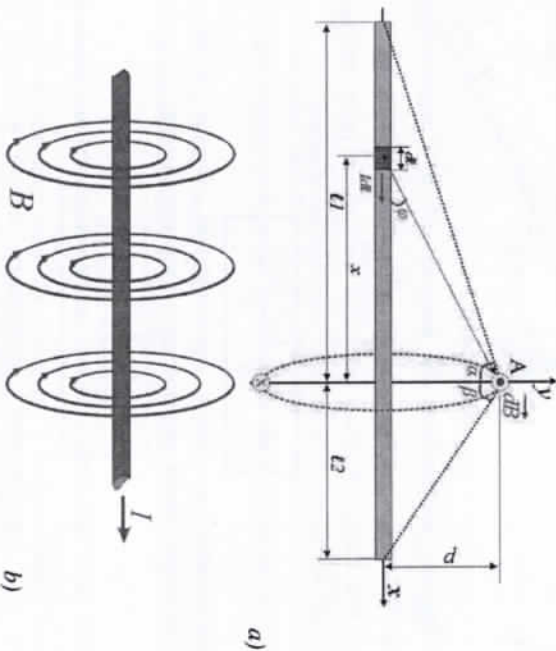


Рисунок 26.3

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\ell \sin \varphi}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idx}{x^2 + d^2} \cdot \frac{d}{\sqrt{x^2 + d^2}} = \frac{\mu_0 Id}{4\pi} \frac{dx}{(x^2 + d^2)^{3/2}}$$

Мы можем определить искомую величину, интегрируя элементарную магнитную индукцию от  $-\ell_1$  до  $+\ell_2$ . В результате расчетов получается следующая формула:

$$\vec{B} = \int dB = \frac{\mu_0 Id}{4\pi} \int_{-\ell_1}^{+\ell_2} \frac{dx}{(x^2 + d^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 Id}{4\pi} \frac{1}{d^2} \cdot \frac{x}{\sqrt{x^2 + d^2}} \Big|_{-\ell_1}^{+\ell_2} = \frac{\mu_0 Id}{4\pi d} \left( \frac{\ell_2}{\sqrt{\ell_2^2 + d^2}} - \frac{-\ell_1}{\sqrt{\ell_1^2 + d^2}} \right) = \frac{\mu_0 I}{4\pi d} (\sin \alpha + \sin \beta) = k \frac{I}{2d} (\sin \alpha + \sin \beta)$$

Таким образом, получается, что магнитная индукция прямого проводника с током с определенной длиной на расстоянии  $r$  от проводника будет равна (рис. 26.3-б):

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\sin \alpha + \sin \beta) = k \frac{I}{2r} (\sin \alpha + \sin \beta) \quad (26.5)$$

Если  $\alpha = \beta = 90^\circ$  по приведенной выше формуле, то поле бесконечного прямого проводника будет равно.

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\sin 90^\circ + \sin 90^\circ) = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (1 + 1) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = k \frac{I}{r}$$

Отсюда следует, что магнитная индукция проводника прямого тока бесконечной длины на расстоянии  $r$  от проводника вычисляется по формуле (рис. 26.3-б):

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = k \frac{I}{r} \quad (26.6)$$

**Магнитное поле вихревого тока:**

Вызываем магнитное поле вихревого тока для точки, сначала находящейся на оси окружности. Затем мы пишем как частный случай для центра круга.

Из произвольной точки  $A$  вращающегося тока получаем элемент тока  $l d\ell$  длиной  $d\ell$ .  $\alpha$  угол между вектором  $d\ell$  и радиусом-вектором  $\vec{r}$ , перенесенным в точку  $M$ ,  $\alpha$  всегда равен  $90^\circ$ . Магнитная индукция элемента тока в точке  $M$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\ell \sin \alpha}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\ell \sin 90^\circ}{\sqrt{R^2 + L^2}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi \sqrt{R^2 + L^2}} d\ell$$

Это проекции элементарной магнитной индукции на оси  $Ox$  и  $Oy$  соответственно.  $\begin{cases} dB_x = dB \cdot \cos \varphi \\ dB_y = dB \cdot \sin \varphi \end{cases}$

Но так как проекции магнитной индукции в точках  $A$  и  $B$ , взятые с противоположных сторон окружности, направлены в противоположные стороны и величины равны, то сумма этих проекций будет равна нулю.

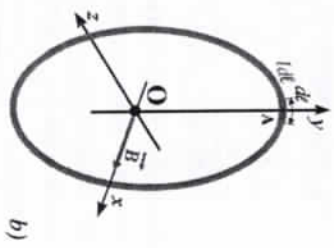
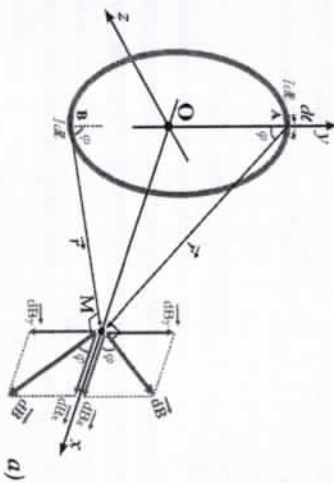


Рисунок 26.4

В результате остается только проекция магнитной индукции на ось  $Ox$ . Следовательно, магнитная индукция, создаваемая вихревым током, равна сумме проекций токовых элементов на ось  $Ox$ , т. е.  $\vec{B} = \oint dB \cos \varphi$ .

Магнитная индукция по нему

$$B = \int_0^{2\pi R} dB_x = \int_0^{2\pi R} \frac{\mu_0 I}{4\pi \sqrt{R^2 + L^2}} \cos \varphi = \frac{\mu_0 I R}{4\pi (R^2 + L^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + L^2)^{3/2}}$$

Отсюда следует, что на произвольном расстоянии  $L$  от центра вихревого тока радиусом  $R$  магнитная индукция равно: (рис. 26.4-а):

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + L^2)^{3/2}} = \pi k \frac{I R^2}{(R^2 + L^2)^{3/2}} \quad (26.7)$$

Если в приведенной выше формуле  $L=0$ , то для магнитной индукции для центра окружности равно:

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + 0^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 I R^2}{2R^3} = \frac{\mu_0 I}{2R} = \pi k \frac{I}{R}$$

Отсюда следует, что магнитная индукция в центре вихревого тока радиусом  $R$  будет равна (рис. 26.4-б):

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} = \pi k \frac{I}{R} \quad (26.8)$$

Таким образом, закон Био-Савара-Лапласа является универсальным законом расчета магнитного поля проводников с током, с помощью которого, можно рассчитать магнитные поля проводников с током, заданных в пространстве или плоскости произвольной формы.

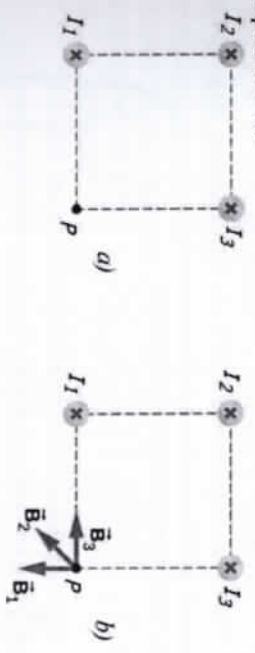
Вопросы на тему:

1. Запишите выражение закона Био-Савара-Лапласа в векторной форме.
2. Запишите выражение закона Био-Савара-Лапласа в скалярном виде.

3. Как определяется магнитное поле заряда, движущегося прямолинейно равномерно?
4. Как определяется магнитное поле ограниченного прямого проводника?
5. Как определяется магнитное поле прямого проводника с бесконечным током?
6. Как определяется магнитное поле в произвольной точке, расположенной на оси вращающегося проводника с током?
7. Как определяется магнитное поле в центре вихревого проводника с током?

Решение задачи:

1. На трех концах квадрата расположены три параллельных проводника с током, по которым проходит одинаковый ток 2 А, направленный к плоскости рисунка (риса). Чему будет равна результирующая магнитная индукция в точке Р на четвертом конце, если сторона квадрата равна 1 см?



**Дано**  $I = 2 \text{ А}$   
 $\varphi = 1 \text{ см}$   
 $B = ?$

**Решение** Сначала определим направления магнитных полей, создаваемых каждым проводником с током (рис.б). Выполняем эту работу, используя правило правого винта. Поле тока  $I_1$  направлено вниз, поле тока  $I_2$  влево, а поле тока  $I_3$  направлено вниз под углом  $45^\circ$  (рис.б).

Теперь вычислим численное значение магнитной индукции, создаваемой каждым током.

$$B_1 = B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Тл} \cdot \text{м} \cdot \text{А}}{2\pi \cdot (10^{-2} \text{ м})} \cdot (2 \text{ А}) = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$$

$$B_3 = \frac{\mu_0 I}{2\sqrt{2}\pi a} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Тл} \cdot \text{м} \cdot \text{А}}{2\sqrt{2}\pi \cdot (10^{-2} \text{ м})} \cdot (2 \text{ А}) = 2\sqrt{2} \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$$

Вычислим сумму проекций найденных значений на ось  $Ox$  и сумму проекций на ось  $Oy$ .

$$V_{r_x} = -V_1 - V_2 \cos 45^\circ = -4 \cdot 10^{-5} \text{ Тл} - (2\sqrt{2} \cdot 10^{-5} \text{ Тл}) \cdot \cos 45^\circ = -6 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$$

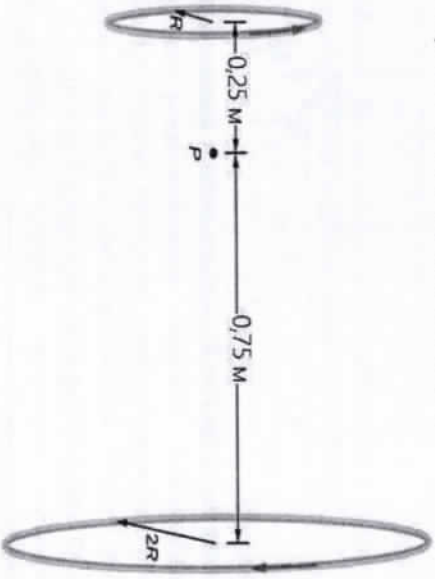
$$V_{r_y} = -V_1 - V_2 \sin 45^\circ = -4 \cdot 10^{-5} \text{ Тл} - (2\sqrt{2} \cdot 10^{-5} \text{ Тл}) \cdot \sin 45^\circ = -6 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$$

Теперь определим результирующую вектор магнитного индукцию поля в точке P.

$$V_r = \sqrt{V_{r_x}^2 + V_{r_y}^2} = \sqrt{(-6 \cdot 10^{-5} \text{ Тл})^2 + (-6 \cdot 10^{-5} \text{ Тл})^2} = -6\sqrt{2} \cdot 10^{-5} \text{ Тл} \approx 8,49 \cdot 10^{-5} \text{ Тл} = 84,9 \text{ мкТл}$$

Ответ:  $V_r = 84,9 \text{ мкТл}$ ; направленный в направлении вектора индукции  $V_2$ .

2. Круговой проводник с током течет одинаковый ток по 10 мА в контурах в противоположную направлении, как показано на рисунке. Было измерено, что одно из колец имеет радиус  $R=50 \text{ см}$ , а другого радиус  $2R=100 \text{ см}$ . Расстояние от первого кольца до точки P, в которой измеряется магнитная индукция, составляет  $0,25 \text{ м}$ , а от второго кольца до точки P расстояние  $0,75 \text{ м}$ . Чему равно результирующее значение вектор магнитной индукции в точке P?



**Дано**  
 $I=10 \text{ мА}$   
 $R=50 \text{ см}$   
 $2R=100 \text{ см}$   
 $L_1=0,25 \text{ м}$   
 $L_2=0,75 \text{ м}$   
 $V_r=?$

**Решение**  
 Сначала определим направления магнитных полей, создаваемых каждым токовым кольцом в точке P. Выполняем эту работу, используя правило правого винта. Поле первого кольца направлено вправо, а поле второго кольца также направлено вправо. То есть магнитные поля обоих токов в точке P направлены в одном направлении. Магнитная индукция каждого кольца токов в точке P вычислим их числовые значения отдельно, а затем сложим их алгебраически.

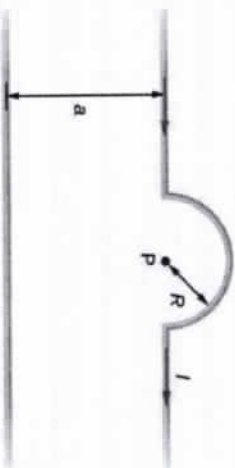
$$V_{r_1} = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + L_1^2)^{3/2}} = \frac{\left(4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{А}}\right) \cdot (10^{-2} \text{ А}) \cdot (0,5 \text{ м})^2}{2 \left((0,5 \text{ м})^2 + (0,25 \text{ м})^2\right)^{3/2}} = \frac{32\pi \cdot 10^{-9} \text{ Тл} \approx 9 \cdot 10^{-9} \text{ Тл}}{5\sqrt{5}}$$

$$V_{r_2} = \frac{\mu_0 I (2R)^2}{2((2R)^2 + L_2^2)^{3/2}} = \frac{\left(4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{А}}\right) \cdot (1,0 \text{ м})^2}{2 \left((1,0 \text{ м})^2 + (0,75 \text{ м})^2\right)^{3/2}} = \frac{128\pi \cdot 10^{-9} \text{ Тл} \approx 3,22 \cdot 10^{-9} \text{ Тл}}{125}$$

$$V_r = V_{r_1} + V_{r_2} = 9 \cdot 10^{-9} \text{ Тл} + 3,22 \cdot 10^{-9} \text{ Тл} = 12,22 \cdot 10^{-9} \text{ Тл} = 12,22 \text{ нТл}$$

Ответ:  $V_r = 12,22 \text{ нТл}$ ; направленный вправо.

3. Один из двух параллельных проводников с током согнут в виде полукруга радиусом R, как на рисунке. Каким должно быть расстояние a между параллельными частями, чтобы результирующая магнитная индукция в точке P стала равной нулю, если по проводникам проходит ток I?



**Дано**  
 $I$   
 $R$   
 $V_{r_{\text{рез}}} = 0$   
 $a=?$

**Решение**  
 Так как точка P лежит на линии прямолинейных участков тока, кроме полуокрестности, то магнитное поле в этой точке образует только полуокрестность. Магнитное поле, создаваемое этой полуокрестностью в точке P, направлено за плоскость изображения по правилу правой руки, а ее числовое значение равно.

$$V_1 = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

Для того чтобы результирующее магнитное поле в точке P стало равным нулю, ток снизу также должен быть направлен в том же направлении, что и ток сверху. Только тогда поле тока внизу в точке P будет направлено к нам от плоскости изображения. Магнитная индукция, создаваемая током ниже точки P равно:

$$V_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

Для выполнения условия задачи

$$\begin{cases} V_2 = V_1 \\ V_2 = -V_1 \end{cases}$$



должно быть. Определяем величина соответственно.

$$\frac{\mu_0 I}{2\pi a} = \frac{\mu_0 I}{2R}, \rightarrow \pi a = 2R, \rightarrow a = \frac{2}{\pi} R$$

Ответ:  $a = \frac{2}{\pi} R$

§ 27. ПОНЯТИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ПОЛЯ. ЗАКОН АМПЕРА.  
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СОЛЕНОИДА И ТОРОИДА.

Циркуляция магнитного поля:

Для расчета магнитной индукции соленоида (катушки с током) и тороида нам потребуется знать понятие циркуляции магнитной индукции. Поскольку понятие циркуляции относится ко всем векторным величинам, давайте рассмотрим это понятие.

Скалярное произведение векторной величины  $\vec{a}$  и  $\vec{\ell}$  вектора смещения, равное скалярной величине, называется выполненной работой векторной в пути.

$$A_n = \vec{a} \cdot \vec{\ell} = a \cdot \ell \cdot \cos \alpha \quad (27.1)$$

Здесь:  $A_n$  — работа вектора  $\vec{a}$  на дуге  $\ell$ . Огдельно следует упомянуть, что если принять силу  $\vec{F}$  за векторную величину  $\vec{a}$ , то работа, выполняемая силой  $\vec{F}$ , будет механической работой  $A_F = \vec{F} \cdot \vec{\ell}$ .

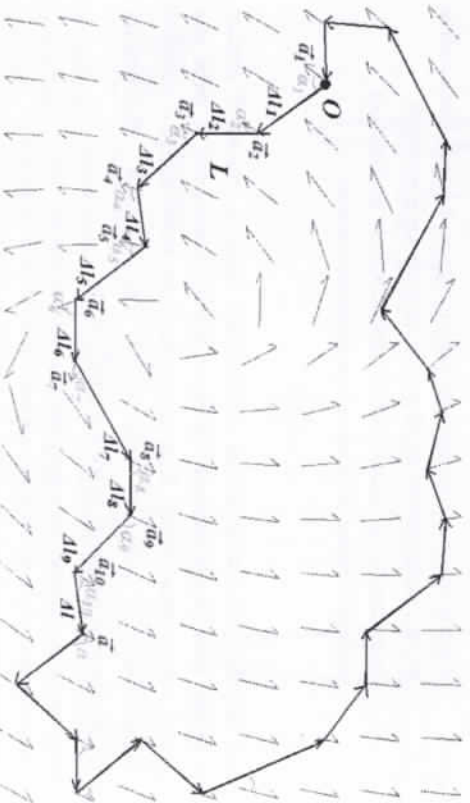


Рисунок 27.1

Пусть задано произвольное векторное поле  $\vec{a} = \vec{a}(x, y, z)$ , характеризующее величину в количественном и направленном выражении.

Это векторное поле, в котором задан замкнутый контур  $L_n$ , пусть задана работа, которую выполняет вектор в замкнутом контуре  $L$ . Для этого мы разрезаем замкнутый контур на небольшие кусочки большого количества и короткой длины  $\Delta \ell_1, \Delta \ell_2, \Delta \ell_3, \dots, \Delta \ell_n$ .  $\vec{a} = \vec{a}(x, y, z)$  вектор — это величина поля в этих частях,  $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3, \dots, \vec{a}_n$  так что пусть эти векторы  $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3, \dots, \vec{a}_n$  образуют углы в соответствии с векторами  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ . Работа векторного поля  $\vec{a} = \vec{a}(x, y, z)$  в замкнутом контуре  $L$  равна сумме небольших работ этого поля в каждом из меньших участков  $\Delta \ell_1, \Delta \ell_2, \Delta \ell_3, \dots, \Delta \ell_n$  (рис.27.1).

Работа векторной величины в замкнутом контуре называется циркуляцией векторной величины и обозначается  $\Pi = \oint \vec{a} d\ell$ .

Циркуляция векторного поля находится следующим образом:

$$\Pi = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n = \vec{a}_1 \cdot \Delta \ell_1 + \vec{a}_2 \cdot \Delta \ell_2 + \vec{a}_3 \cdot \Delta \ell_3 + \dots + \vec{a}_n \cdot \Delta \ell_n = \sum_{i=1}^n a_i \Delta \ell_i \cos \alpha_i + \sum_{i=1}^n a_i \Delta \ell_i \cos \alpha_i + \dots + \sum_{i=1}^n a_i \Delta \ell_i \cos \alpha_i \quad (27.2)$$

В более коротком виде циркуляция векторного поля определяется следующим образом:

$$C = \sum_{i=1}^n A_i = \sum_{i=1}^n \vec{a}_i \cdot \Delta \ell_i = \sum_{i=1}^n a_i \Delta \ell_i \cos \alpha_i \quad (27.3)$$

Найденные формулы  $\vec{a} = \vec{a}(x, y, z)$  дают приближительную циркуляцию векторного поля в замкнутом контуре  $L$ . Для определения точного значения циркуляции  $L$  замкнутый контур нужно будет разбить на бесконечное количество отрезков ( $n \rightarrow \infty$ ) и сложить элементарные произведения. При этом длина  $\Delta \ell_i$  превращается в элементарную длину  $d\ell$ , а знак  $\sum$  в символ  $\int$ . Интегральное представление циркуляции векторного поля будет выглядеть следующим образом:

$$\Pi = \oint \vec{a} d\ell = \oint \vec{a} \vec{a} d\ell \quad (27.4)$$

Поскольку магнитная индукция также является векторной величиной, ее циркуляция также должна иметь значение. Поэтому попробуем вычислить циркуляцию магнитного поля.

Вначале рассмотрим случай, когда контур лежит в перпендикулярной плоскости тока (ток направлен в обратную сторону от плоскости индукции) (рис.27.2). В каждой точке контура вектор  $\vec{B}$  направлен по касательной к окружности, проходящей через эту точку.

Поспользуемся свойством скалярного умножения векторов.

$B, d\ell = Bd\ell_n$ , здесь  $d\ell_n = R d\alpha$  —  $d\ell$ , проекция вектора на вектор  $\vec{B}$ .  $R$  расстояние от  $d\ell$  прямой до  $I$ .

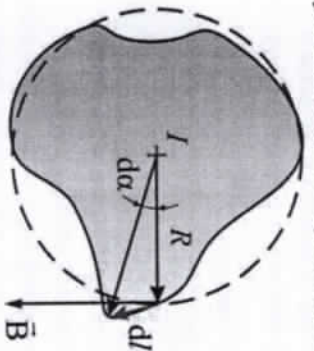


Рисунок 27.2

$$B, d\ell = Bd\ell_n = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} R d\alpha = \frac{\mu_0 I}{2\pi} d\alpha$$

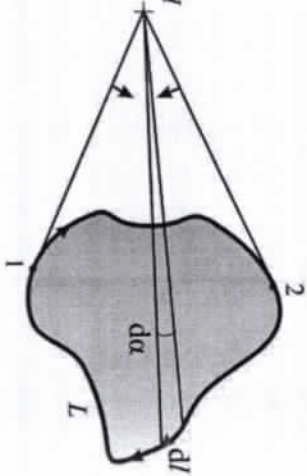


Рисунок 27.3

Из этого следует циркуляция тока, охватываемого контуром.

$$C = \oint \vec{B}, d\vec{\ell} = \int_0^{2\pi} \frac{\mu_0 I}{2\pi} d\alpha = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot 2\pi = \mu_0 I \quad (27.5)$$

Если контур не замкнут током, то есть ток находится за пределами контура, то рассмотрим, как происходит циркуляция магнитного поля (рис.27.3). При этом обводит контур так, как на рисунке, когда вертикальная прямая сначала поворачивается в одну сторону ( $1 \rightarrow 2$ ), а затем в противоположную ( $2 \rightarrow 1$ ). Следовательно, замкнутый контур будет иметь общий угол поворота радиальной прямой, когда мы обведем контур один раз  $\oint d\alpha = 0$ .

Следовательно, оказывается, что циркуляция магнитной индукции этого тока равна нулю, когда проводник с током проходит за пределы замкнутого контура.

$$\Pi = \oint \vec{B}, d\vec{\ell} = 0 \quad (27.6)$$

Таким образом, оказывается, что циркуляция вектора магнитной индукции прямо пропорциональна алгебраической сумме токов, проходящих через замкнуты контур. Токи, проходящие вне контура, не зависят от него.

$$\Pi_B = \oint \vec{B}, d\vec{\ell} = \mu_0 \cdot \sum_{i=1}^n I_i \quad (27.7)$$

Если вспомнить, что между индукцией и напряжением магнитного поля существует связь  $B = \mu_0 H$ , то это выражение для циркуляции напряженности магнитного поля можно записать:

$$\Pi_H = \oint \vec{H}, d\vec{\ell} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (27.8)$$

Первым А.Ампер доказал, что циркуляция магнитного поля зависит от силы тока. Поэтому эту связь называют законом Ампера.

*Закон Ампера: циркуляция магнитного поля прямо пропорциональна алгебраической сумме сил тока, проходящего через замкнутую линию.*

Следующая выводимая формула определяется циркуляцией вектора магнитной индукции.

*Магнитное поле внутри прямого тока:*

Используя циркуляцию магнитного поля, можно определить индукцию магнитного поля внутри проводника с током.

Пусть нам дан проводник с током радиусом  $R$ , по которому протекает ток  $I$ . Пусть задано определение магнитной индукции в точке, лежащей на внутри этого проводника с током на произвольном ( $r < R$ ) расстоянии от его центра (рис.27.4-а). Длина окружности  $2\pi r$  с радиусом  $r$ , а с поверхностью  $\pi r^2$ , при этом сила тока, проходящего через эту поверхность будет равно.

$$i = J \pi r^2 = \frac{I}{\pi R^2} \pi r^2 = \left(\frac{r}{R}\right)^2 \cdot I$$

Индукция магнитного поля длиной  $2\pi r$ , циркулирующая по окружности будет равно.

$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 i = \mu_0 \left(\frac{r}{R}\right)^2 \cdot I$$

Из этого получается следующая выражения.

$$B = \frac{r}{R} \cdot \frac{\mu_0 I}{2\pi R} = \frac{r}{R} B_{\max}$$

Отсюда следует, что на произвольном ( $r < R$ ) расстоянии от центра проводника с током радиусом  $R$  индукция магнитного поля имеет следующую зависимость (рис.27.4).

$$B = \frac{r}{R} \cdot \frac{\mu_0 I}{2\pi R} = \frac{r}{R} B_{\max} \quad (27.9)$$

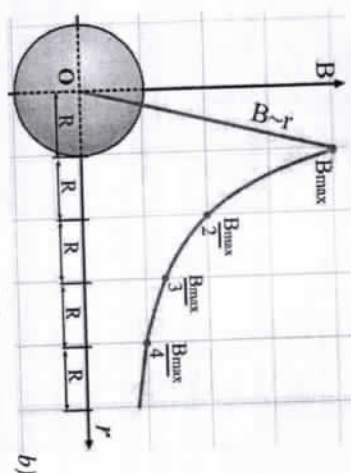
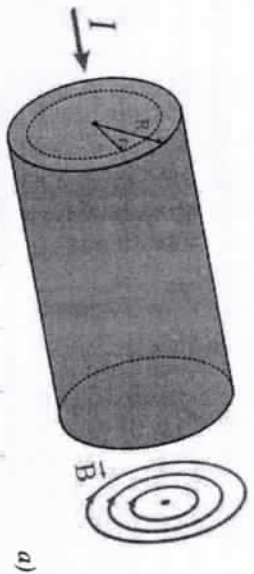


Рисунок 27.4

Здесь:  $B_{max} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$  — магнитная индукция на поверхности проводника с током, а наибольшая индукция, создаваемая проводником с током, происходит на поверхности проводника (рис.27.4-б). Как видно из рисунка, в внутренней части проводника ( $r < R$ ) значение магнитной индукции прямо пропорционально расстоянию ( $B \sim r$ ), а во внешней части проводника ( $r > R$ ) значение магнитной индукции обратно пропорционально расстоянию ( $B \sim 1/r$ ), то есть.

**Магнитное поле соленоида:**

Используя циркуляцию магнитного поля, можно определить индукцию магнитного поля внутри токового соленоида.

Поскольку соленоид имеет бесконечную длину, линии магнитной индукции внутри этого соленоида параллельны оси соленоида и взаимно перпендикулярны. Другими словами, магнитное поле внутри соленоида является однородным полем. Из соленоида, имеющего бесконечную длину, получаем прямоугольный четырехугольник abcd (рис.27.5). Стороны ad и bc этого прямоугольника перпендикулярны линиям магнитной индукции, а стороны ab и cd, имеющие длину  $\ell$ , параллельны линиям магнитной индукции. Определим работу, выполняемую вектором магнитной индукции в каждом сечении. Работа вектора магнитной индукции, выполняемая АВ в пути

$$A_{ab} = B \cdot ab \cdot \cos 0^\circ = B\ell$$

работы, выполненной в пути bc и ad равно

$$A_{bc} = A_{ad} = B \cdot bc \cdot \cos 90^\circ = 0$$

В то время как работа, которую sd выполняет на пути, так как вне соленоида нет поля

$$A_{sd} = 0 \cdot cd \cdot \cos 0^\circ = 0$$

Отсюда и циркуляция магнитного поля по прямоугольному четырехугольнику abcd будет равно:

$$\oint l = \oint dA = A_{ab} + A_{bc} + A_{cd} + A_{da} = B\ell + 0 + 0 + 0 = B\ell$$

С другой стороны, через замкнутый контур проходит ток NI. Из формулы циркуляции магнитного поля  $C_n = \oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \cdot \sum_{i=1}^n I_i$ , следует

$B\ell = \mu_0 NI$ . Тогда магнитная индукция внутри соленоида равно

$$B = \mu_0 I \frac{N}{\ell} = \mu_0 I n$$

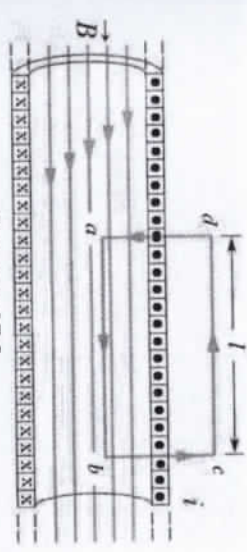


Рисунок 27.5

Отсюда следует, что магнитная индукция на внутри бесконечного длинного соленоида с током будет равно (рис. 27.5):

$$B = \mu_0 I \frac{N}{\ell} = \mu_0 I n \quad (27.10)$$

Здесь:  $N = n\ell$  называется плотностью обмоток, что означает, сколько обмоток имеет соленоид длиной  $\ell$  м.

**Магнитное поле тороида:**

Тороид образуется, если ось соленоида согнуть и привести его в форму круга. Используя циркуляцию магнитного поля, можно определить индукцию магнитного поля внутри токового тороида.

Ось тороида состоит из окружности радиусом R. Определим магнитной индукции на оси тороида. Для этого воспользуемся циркуляцией вектора магнитной индукции по окружности радиусом R. В результате получаем индукцию

$$H = B \cdot (\cos 0^\circ) \cdot \cos 0^\circ = \mu_0 \cdot (NI), \rightarrow B = \mu_0 \cdot \frac{NI}{2\pi r}$$

Следовательно, магнитная индукция внутри тороида с током имеет:

$$B = \mu_0 I \frac{N}{2\pi r} = \mu_0 I n \quad (27.11)$$

Все выше приведенные формулы для определения магнитной индукции применимы только для проводника с током в вакууме. Если определяем магнитную индукцию в среде любого из этих токопроводящих проводников, умножим найденную формулу для вакуума на

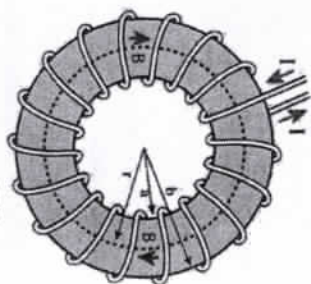


Рисунок 27.5

величину  $\mu$ , характеризующую магнитное свойство среды. Например, если центр соленоида имеет магнитную индукцию  $B = \mu_0 I n$ , то индукция при введении магнитной среды в сердечник  $B = \mu \mu_0 I n$ .

Вопросы на тему:

1. Что такое работа векторной величины на пути? Чем эта работа отличается от механической?
2. Что такое циркуляция векторного поля? Напишите формулу.
3. От каких величин зависит циркуляция магнитного поля?
4. Когда циркуляция магнитного поля будет равна нулю?
5. Чем равна индукция поля в проводнике с током? По какому закону изменяется его величина?
6. Приведем выражение магнитной индукции в сердечнике соленоида.
7. Приведем выражение магнитной индукции в центре тороида.

**Решение задач:**

1. Количество обмоток 600, через соленоид длиной 1 м проходит ток 2 А. Сколько А/м напряженности магнитного поля внутри него?

- A) 1200 B) 300 C) 600 D) 200 E) 400

**Дано**

$$N=600$$

$$I=2 \text{ A}$$

$$l=1 \text{ м}$$

$$H=?$$

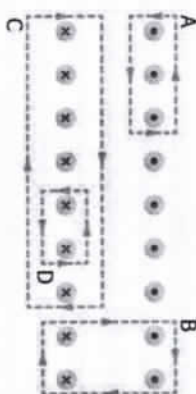
**Решение**

Применяем формулу, связывающую магнитную индукцию и магнитное напряжение.

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{\mu_0 I n}{l} = I n = I \cdot \frac{N}{l} = 2 \text{ A} \cdot \frac{600}{1 \text{ м}} = 1200 \frac{\text{A}}{\text{м}}$$

Ответ: A) 1200 А/м

2. На рисунке изображено поперечное сечение бесконечного длинного соленоида. Из этого соленоида течет ток, равный 0,3 А. Рассчитайте циркуляцию магнитного поля для заданных траекторий, показанных на рисунке.



**Дано**

$$I=0,3 \text{ A}$$

$$B=?$$

**Решение**

Вычисление циркуляции магнитного поля для заданных замкнутых траекторий, показанных на

$$H = \oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \cdot \sum_{i=1}^n I_i$$

рассчитаем с помощью закона Ампера.

$$I_A = \mu_0 \cdot (I + I + I) = 3\mu_0 I = 3 \cdot \left( 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{А}} \right) \cdot 0,3 \text{ A} = 1,1310^{-6} \text{ Тл} \cdot \text{м}$$

$$I_B = \mu_0 \cdot (I + I - I) = 0$$

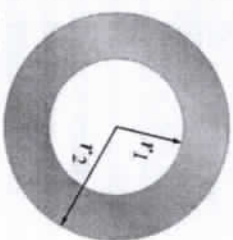
$$I_C = \mu_0 \cdot (I + I + I + I + I + I) = 7\mu_0 I = 7 \cdot \left( 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{А}} \right) \cdot 0,3 \text{ A} = 2,634 \cdot 10^{-6} \text{ Тл} \cdot \text{м}$$

$$I_D = \mu_0 \cdot (-I - I) = -2\mu_0 I = -2 \cdot \left( 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{А}} \right) \cdot 0,3 \text{ A} = -7,54 \cdot 10^{-7} \text{ Тл} \cdot \text{м}$$

Ответ:

$$C_A = 1,13 \cdot 10^{-6} \text{ Тл} \cdot \text{м}; C_B = 0; C_C = 2,634 \cdot 10^{-6} \text{ Тл} \cdot \text{м}; C_D = -7,54 \cdot 10^{-7} \text{ Тл} \cdot \text{м}$$

3. На рисунке изображена поперечная поверхность пологого длинного токопроводящего цилиндрического проводника. Внутренний радиус проводника равен  $r_1=3 \text{ см}$ , а внешний радиус равен  $r_2=5 \text{ см}$ . Однородный ток, величина которого  $I=50 \text{ A}$ , протекает через поперечную поверхность проводника в сторону учебника от проводника. Вычислить магнитную индукцию в точках, удаленных  $r=2 \text{ см}$ ,  $r=4 \text{ см}$  и  $R=6 \text{ см}$  от центра проводника.



**Дано**  
 $I=50$  А  
 $r_1=3$  см  
 $r_2=5$  см  
 $r=2$  см  
 $r=4$  см  
 $r=6$  см  
 $H=?$

**Решение**  
 Однородный ток течет по проводнику той формы, которая изображена на рисунке – это означает, что плотность тока постоянна. Используя это, мы можем определить силу тока, проходящего через произвольно радиально разделенный участок поверхности.  
 Сначала определимся с плотностью тока.

$$j = \frac{I}{S} = \frac{I}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} = \frac{50 \text{ А}}{3,14 \cdot (5 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2 - (3 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2} = \frac{50 \text{ А}}{3,14 \cdot 16 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2} = 9947 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$$

Теперь для каждого значения  $r$  определим запрошенную величину.  
 а) для  $R=2$  см  $< r_1=3$  см нет тока, проходящего через окружность радиусом  $r=2$  см. Поэтому значение циркуляции равно

$$V = \mu_0 I \frac{N}{2\pi r} = \mu_0 I \frac{0}{2\pi r} = 0$$

б) для решения этого условия сначала определим силу тока, проходящего через внутри окружности  $r_1=3$  см а также  $r=4$  см определим силу.

$$\Delta S = \pi(r^2 - r_1^2) = ((4 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2 - (3 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2) = 3,14 \cdot 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$\Delta I = j \cdot \Delta S = 9947 \frac{\text{А}}{\text{м}^2} \cdot 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 = 21,875 \text{ А}$$

С помощью циркуляции определим магнитную индукцию для точек радиусом  $r=4$  см.

$$V \cdot 2\pi r = \mu_0 \cdot \Delta I, \rightarrow V = \frac{\mu_0 \cdot \Delta I}{2\pi r} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{А}}}{2\pi \cdot (4 \cdot 10^{-2} \text{ м})} \cdot (21,875 \text{ А}) = 10,9375 \cdot 10^{-5} \text{ Тл} = 109,38 \text{ мкТл}$$

с) так как окружность радиусом  $r=6$  см охватывает весь токоведущий проводник, то магнитная индукция в этой точке будет:

$$V \cdot 2\pi r = \mu_0 \cdot I, \rightarrow V = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{А}}}{2\pi \cdot (4 \cdot 10^{-2} \text{ м})} \cdot (50 \text{ м}^2) = 25 \cdot 10^{-5} \text{ Тл} = 250 \text{ мкТл}$$

Ответ: А) 1200 А/м

4. Тороид имеет 250 обмоток, и сила тока в нем равна  $I=20$  А. Его внутренний и внешний радиусы равны  $r_1=8$  см и  $r_2=9$  см соответственно. Определить напряженность магнитного поля на расстояниях  $r=8,1$  см,  $r=8,5$  см и  $R=8,9$  см от центра тороида.

**Дано**  
 $N=250$   
 $I=20$  А  
 $r_1=8$  см  
 $r_2=9$  см  
 $a) r=8,1$  см  
 $b) r=8,5$  см  
 $c) r=8,9$  см  
 $H=?$

**Решение**  
 а) внутри тороида магнитное поле не однородно, его величина зависит от расстояния от произвольной точки внутри тороида до центра тороида.  

$$V = \mu_0 I \frac{N}{2\pi r}, \rightarrow H = \frac{V}{\mu \mu_0} = \frac{NI}{2\pi r}$$
  
 Рассчитаем значения напряжений магнитного поля в выбранных точках.

а)  $H = \frac{NI}{2\pi r} = \frac{250 \cdot 20 \text{ А}}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 9824,3 \frac{\text{А}}{\text{м}}$   
 б)  $H = \frac{NI}{2\pi r} = \frac{250 \cdot 20 \text{ А}}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 9362,0 \frac{\text{А}}{\text{м}}$   
 в)  $H = \frac{NI}{2\pi r} = \frac{250 \cdot 20 \text{ А}}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,9 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 8941,3 \frac{\text{А}}{\text{м}}$

Ответ: а) 9824,3 А/м; б) 9362 А/м; в) 8941,3 А/м

**§ 28. СИЛА ЛОРЕНЦА. ТРАЕКТОРИЯ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

**Сила Лоренца и ее направление:**

Причину возникновения силы Ампера, действующей на проводник с током, введенным в магнитное поле, голландский ученый-теоретик Хендрик Антон Лоренц (1853-1928) объясняет следующим образом: на упорядоченно движущиеся заряженные частицы, образующие ток в проводнике, действует магнитное поле. Но эти заряженные частицы не могут покинуть поверхность проводника, то есть двигаться в пределах объема, ограниченного поверхностью проводника. Силы, действующие магнитным полем на эти движущиеся частицы, складываются, образуя суммарную силу – силу Ампера. Поэтому с помощью закона Ампера можно будет определить силу, действующую на один элементарный заряд  $q$ , движущийся внутри проводника с током.

Сила, действующая магнитным полем на заряженную частицу, движущуюся в однородном магнитном поле, называется силой Лоренца.

Другими словами, сила Ампера – это сила, действующая на  $N$  заряженных частиц в проводнике с током, тогда как сила Лоренца – это сила,

действующая на одну заряженную частицу. Следовательно, оказывается, что можно сделать вывод, что сила Лоренца в  $N$  раз меньше силы Ампера ( $F_L = \frac{F_A}{N}$ ). Сила тока в проводнике

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{Nq}{t} = \frac{Nqg}{\ell} = \frac{NqgS}{V} = nqgS$$

Теперь приведем формулу для силы Лоренца. В результате получаем формулу.

$$F_L = \frac{F_A}{N} = \frac{B I \ell \sin \alpha}{N} = \frac{B(nqgS)\ell \sin \alpha}{N} = qgS \sin \alpha \frac{nS\ell}{N} = qgS \sin \alpha$$

Следовательно, значение силы Лоренца имеет следующую выражено:

$$F_L = qvB \sin \alpha \quad (28.1)$$

*Сила, действующая на электрический заряд, движущийся в магнитном поле, равна произведению синуса угла между векторной этого заряда, скоростью заряда, вектором индукции магнитного поля, скоростью и вектором индукции.*

Направление силы Лоренца совпадает с направлением силы Ампера.

Направление силы Лоренца перпендикулярно плоскости  $\vec{v}$ ,  $\vec{B}$ , в которой лежат вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  и направление движения заряда  $\vec{v}$ , направление которого определяется правилом левой руки, как сила Ампера.

*Если, держа левую руку так, чтобы вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ , перпендикулярный скорости заряда, входил в ладонь ладони, наши четыре разведенных пальца были вытянутыми в направлении положительного заряда (противоположном направлению отрицательного заряда), то большой палец, повернутый к  $90^\circ$ , указывает направление силы  $F_L$ . Лоренца, действующей на заряд (рис.28.1).*

Поскольку в каждый момент движения заряженной частицы направление силы Лоренца перпендикулярно направлению магнитного поля, то есть угол между силой и перемещением всегда равен  $90^\circ$ , то работа, выполняемая силой Лоренца, всегда равна нулю. Сила Лоренца не изменяет кинетическую энергию частицы и величину ее скорости, а лишь непрерывно изменяет направление скорости.

*Траектория заряженной частицы в магнитном поле:*

Если заряженная частица летит перпендикулярно в однородное магнитное поле, ее траектория будет состоять из окружности, так как сила



Рисунок 28.1

Лоренца непрерывно меняет направление движения частицы. По правилу левой руки легко определить, в каком направлении происходит движение по окружности (по часовой стрелке или против нее). На рисунке 26.2 изображено направление траектории положительно и отрицательно заряженной частицы, летящей перпендикулярно в направленном от нас магнитном поле.

*Если от нас направлен вектор индукции однородного магнитного поля, к которому летящий отрицательный заряд направлен перпендикулярно, то траектория вращения будет по часовой стрелке.*

*Если от нас направлен однородный вектор магнитной индукции, к которому летящий положительный заряд направлен перпендикулярно, то траектория вращения будет против часовой стрелки.*

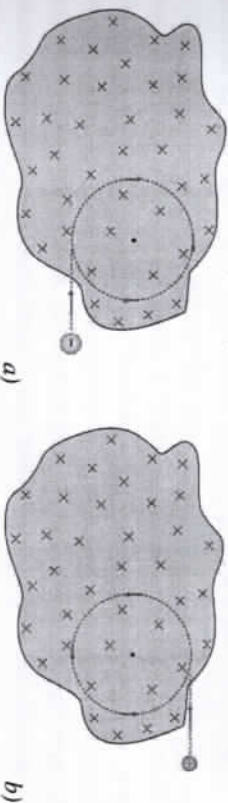


Рисунок 28.2

Можно определить радиус вращения, период вращения и частоту вращения траектории заряженной частицы, летящей перпендикулярно в однородное магнитное поле. При этом траектория состоит из окружности, а в качестве силы, стремящейся к центру, выступает сила Лоренца. Сила Лоренца и центробежная сила инерции будут равны. С его помощью можно определить запущенные величины (рис.28.3).

$$F_{\text{центр}} = F_L \rightarrow \frac{m \cdot g^2}{R} = qgV, \rightarrow R = \frac{m \cdot g}{qV}$$

Найдем период вращения по формуле для скорости  $g = \frac{2\pi R}{T}$ .

$$R = \frac{m \cdot g}{qV} = \frac{m \cdot 2\pi R}{qV T} \rightarrow T = 2\pi \frac{m}{q|V|}$$

определяем частоту вращения с помощью  $v = \frac{1}{T}$ .

$$v = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \frac{|q|V}{m}$$

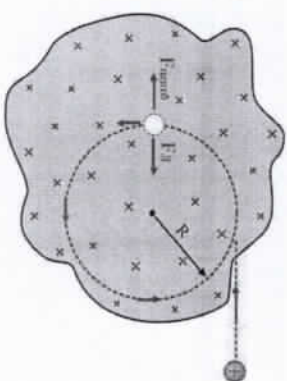


Рисунок 28.3

Следовательно, радиус вращения заряда с массой  $m$ , пролетевшего перпендикулярно линиям индукции  $B$  со скоростью  $v$ , равен  $r$ , период вращения равен  $T$ , частота вращения  $\nu$  равна:

$$R = \frac{m \cdot g}{|q| B}, \quad T = 2\pi \frac{m}{|q| B}, \quad \nu = \frac{1}{2\pi} \frac{|q| B}{m} \quad (28.2)$$

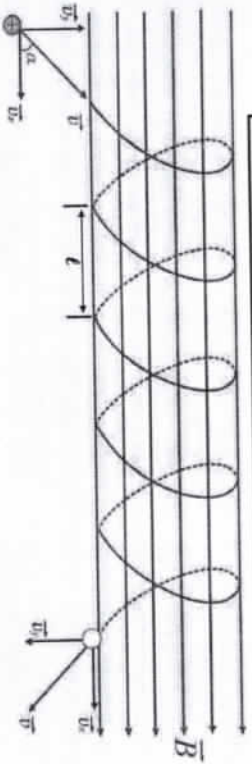


Рисунок 28.4-г)а)а)а)

Если заряженная частица влетает в однородное магнитное поле под углом, ее траектория становится винтовой с неизменным шагом (рис.28.4). Магнитное поле перпендикулярно направлению поля вектора скорости действует на составляющий  $v_y$  силы Лоренца и непрерывно меняет свое направление, не изменяя величину этого составляющего, т. е.  $v_y$  вращает. Магнитное поле не влияет на составляющую  $v_x$  вектора скорости, параллельную направлению поля. Другими словами, в этом направлении заряженная частица движется на равное расстояние за равные промежутки времени. Это расстояние сдвигается называется шагом винта.

Радиус поворота, период вращения и частота вращения траектории заряженной частицы, которая вошла в однородное магнитное поле под углом, и шаг винта могут быть определены так же, как если бы заряженная частица летела перпендикулярно. При этом траектория является неподвижной ступенчатой винтовой, а в качестве центробежной силы выступает сила Лоренца. Сила Лоренца и центробежная сила инерции будут равны между собой. С его помощью можно определить

$$F_{\text{инерт}} = F_L, \rightarrow \frac{m \cdot v_y^2}{R} = q \cdot v_y \cdot B, \rightarrow R = \frac{m \cdot v_y}{q \cdot B} = \frac{m \cdot v \cdot \sin \alpha}{q \cdot B}$$

Найдем период вращения по формуле для скорости  $v_y = 2\pi R \cdot \nu$ .

$$R = \frac{m \cdot v_y}{q \cdot B} = \frac{m \cdot 2\pi R \cdot \nu}{q \cdot B}, \rightarrow T = 2\pi \frac{m}{|q| B}$$

Определяем частоту вращения с помощью  $\nu = \frac{1}{T}$ .

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \frac{|q| B}{m}$$

Шаг винта в то время определяется следующим образом:

$$l = v \cdot T = 2\pi \frac{m}{|q| B} \cdot v \cdot \cos \alpha$$

Следовательно, на линиях вектор магнитную индукции  $B$ , пролетевших  $\alpha$  под углом  $\theta$  со скоростью, радиус вращения массивного заряда  $r$ , период вращения  $T$ , частота вращения  $\nu$  и шаг винта  $l$  будет равен (рис. 28.4):

$$R = \frac{m \cdot v \cdot \sin \alpha}{|q| B}, \quad T = 2\pi \frac{m}{|q| B}, \quad \nu = \frac{1}{2\pi} \frac{|q| B}{m}, \quad l = 2\pi \frac{m}{|q| B} \cdot v \cdot \cos \alpha \quad (28.3)$$

Приведенная формула предназначена для заряженной частицы, пролетевшей под углом в однородном магнитном поле, показанном на рисунке 28.4. При этом траектория частицы будет винтовой с неизменным шагом. Если магнитное поле неоднородное, с возрастающей величиной, то с увеличением радиуса кривизны уменьшается и траектория частицы напоминает траекторию, поученную по поверхности конуса (рис.28.5).

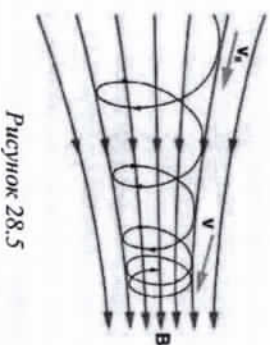


Рисунок 28.5

Вопросы по теме:

1. Что такое сила Лоренца? Какова его направленность? Выполняет ли сила Лоренца работу?
2. Каковы траектории заряженных частиц с положительными и отрицательными знаками, летящих перпендикулярно в однородном магнитном поле?
3. Каковы формулы для определения радиуса, периода вращения и частоты вращения для заряженной частицы, перпендикулярно пролетающей в однородном магнитном поле?
4. В какую сторону направлена сила Лоренца, если скорость положительного заряда направлена по оси  $Ox$ , а направление магнитного поля по оси  $Oy$ ?
5. В какую сторону направлена сила Лоренца, если скорость отрицательного заряда направлена по оси  $Ox$ , а направление магнитного поля по оси  $Oy$ ?
6. Какова траектория заряженной частицы, летящей под углом к однородному магнитному полю? Каковы будут формулы для определения радиуса, периода и частоты вращения Земли?
7. Какой вид траектории заряженной частицы, летящей под углом к неоднородному магнитному полю?

Решение задач:

1. Какая сила действует на протон, движущийся со скоростью 10 Мм/с перпендикулярно линиям индукции в магнитном поле с индукцией 0,2 Тл.

Дано

$$B = 0,2 \text{ Тл}; \alpha = 90^\circ$$

$$v = 10 \text{ Мм/с}$$

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

$$F_L = ?$$

Решение

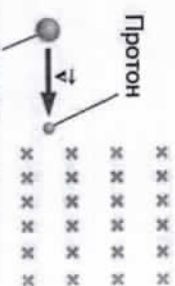
Решим задачу по формуле силы Лоренца.

$$F_L = qvB \sin \alpha = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,2 \cdot 10^7 = 0,32 \text{ рН}$$

Ответ: 0,32 пН

2. Протон находится в покое вблизи границы однородного магнитного поля,  $\alpha$ -частица, движущаяся в горизонтальном направлении, упрugo ударяется о протон, находящийся в направлении движения. На короткое время после столкновения обе частицы влетают в  $\alpha$ -частица после столкновения обе частицы влетают в магнитное поле перпендикулярно к линиям индукции. Радиус траектории протона равен  $R$ .

$\alpha$ -частица имеет массу в 4 раза большую, чем протон, а ее заряд в 2 раза больше, чему равен радиус траектории  $\alpha$ -частицы?



Дано

$$g_p = 0$$

$$g_\alpha = g$$

$$R_p = R$$

$$m_\alpha = 4m_p$$

$$q_\alpha = 2q_p$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$R_\alpha = ?$$

Решение

Определим прежде всего скорости частиц после упругого столкновения. Для этого воспользуемся известными из механики формулами.

$$\begin{cases} g'_p = \frac{m_p g_p + m_\alpha g_\alpha - m_\alpha (g_p - g_\alpha)}{m_p + m_\alpha} = \frac{m_p \cdot 0 + 4m_p g - 4m_p (0 - g)}{m_p + 4m_p} = 1,6g \\ g'_\alpha = \frac{m_p g_p + m_\alpha g_\alpha + m_p (g_p - g_\alpha)}{m_p + m_\alpha} = \frac{m_p \cdot 0 + 4m_p g + m_p (0 - g)}{m_p + 4m_p} = 0,6g \end{cases}$$

Теперь определим искомый радиус.

$$\begin{aligned} R_p &= \frac{m_p g'_p}{q_p B} = \frac{m_p \cdot 1,6g}{q_p B} = 1,6 \frac{m_p g}{q_p B} = R, \rightarrow \frac{m_p g}{q_p B} = \frac{R}{1,6} \\ R_\alpha &= \frac{m_\alpha g'_\alpha}{q_\alpha B} = \frac{4m_p \cdot 0,6g}{2q_p B} = 1,2 \frac{m_p g}{q_p B} = 1,2 \cdot \frac{R}{1,6} = \frac{3}{4} R \end{aligned}$$

Ответ:  $R_\alpha = \frac{3}{4} R$

§ 29. ВЕКТОР НАМАГНИЧЕННОСТИ, НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ И МАГНИТНОЕ ПРОНИЦАЕМОСТЬ.

Вектор намагниченности:

В предыдущих темах мы изучали магнитное поле для вакуума. Когда вещество вводится в магнитное поле, это вещество намагничивается и

создает частное магнитное поле  $\vec{B}'$ . Следовательно, можно сказать, что результирующая индукция магнитного поля  $\vec{B}$  в исследуемом веществе состоит из геометрической суммы индукции внешнего поля  $\vec{B}_0$  и  $\vec{B}'$  индукция частного поля вещества.

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' \quad (29.1)$$

Чаще всего  $\vec{B}'$  поле называют внутренней полем индукцией, создаваемой намагниченностью микро-токами внутри вещества, а  $\vec{B}_0$  поле-полем индукцией в вакууме (вне среды), создаваемой макро-токами. Все вещества как-то образом намагничиваются при введении в магнитное поле. По этой причине при изучении магнитных свойств веществ введем термин "магнетик". Магнитные свойства магнетиков определяются движением элементарных частиц (электронов, протонов и нейтронов) в атоме. Расчеты показали, что магнитные эффекты электронов будут намного сильнее, чем у протонов и нейтронов.

Согласно современным представлениям, электроны в атоме вращаются вокруг ядра, участвуя во всех частных вращательных движениях вокруг своей оси. Следовательно, как электроны в атоме будут иметь орбитальные  $\vec{p}_{orb}$  и  $\vec{p}_{spin}$  частные магнитные моменты. Результирующий магнитный момент атома будет состоять из геометрической суммы орбитальных и частных магнитных моментов электронов в атоме.

$$\vec{P}_{атом} = \sum \vec{P}_{orb} + \sum \vec{P}_{spin} \quad (29.2)$$

Магнитные моменты атомов магнита, не подверженных влиянию внешнего магнитного поля, хаотичны, а результирующий суммарный магнитный момент атомов в осколке магнита равен нулю. Под действием внешнего поля направления некоторых атомов переориентируются, т. е. направления магнитных моментов упорядочены. В результате магнит приобретает магнитный момент, отличный от нуля. Различные магнетики под действием внешнего поля намагничиваются по-разному, для характеристики степени их намагниченности введем понятие вектора намагниченности.

Вектор намагниченности — это векторная величина, равная геометрической сумме магнитных моментов всех атомов в элементарном объеме  $\Delta V$ .

$$\vec{J} = \frac{\Delta p}{\Delta V} \left[ \frac{A}{M} \right] \quad (29.3)$$



Согласно расчетам получается, что циркуляция вектора намагниченности будет равна сумме микротоков.

$$\oint \vec{j} \cdot d\vec{\ell} = \sum I_m \quad (29.4)$$

Из формулы видно, что если на магнетик не воздействовал внешний магнит, то  $J=0$  а также  $\sum I_m = 0$  будет. Другими словами, поскольку все направления одинаково вероятны, заряды, вращающиеся вокруг всех направлений, одинаковы, и их результирующий эффект равен нулю. Что же касается воздействия магнитного поля  $J \neq 0$ , то оно также происходит  $\sum I_m \neq 0$ , т. е. преобладают заряды, вращающиеся в одном направлении.

*Напряженность магнитного поля:*

При исследовании магнитного поля в магнитах мы используем два типа токов. Первым из них является ток проводимости, который также называют макротоком. Вторым-это микротоки, которые возникают из-за движения электронов внутри атома, молекулы и ионов. *Микротоки* – это вихревые токи, возникающие от *движения* по окружности элементарных зарядных частей.

Поскольку магнитное поле в вакууме возникает только за счет макротоков, циркуляция этого поля была бы найдена по формуле  $\oint \vec{B}_0 \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \sum I$ . При расчете циркуляции магнитного поля в магнитике, помимо макротоков, необходимо будет учитывать и микро-токи.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \oint (\vec{B}_0 + \vec{B}) \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 (\sum I + \sum I_m) \quad (29.5)$$

Эта формула называется *законом полного тока* для магнитного поля в веществе.

Принимая во внимание выражение для микротока  $\oint \vec{j} \cdot d\vec{\ell} = \sum I_m$ , мы записываем приведенную выше формулу, преобразовав ее в:

$$\oint \left( \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{j} \right) \cdot d\vec{\ell} = \sum I = \frac{1}{\mu_0} \oint \vec{B}_0 \cdot d\vec{\ell} \quad (29.6)$$

Из этой формулы

$$\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{j} = \vec{H} \quad (29.7)$$

определив, что:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \sum I = \oint \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} \cdot d\vec{\ell} \quad (29.8)$$

Из этой формулы получается формула

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} \quad (29.9)$$

Вектор  $\vec{H}$ , введенный в приведенные выше формулы, называется вектором напряженности магнитного поля.

Вектор напряженности магнитного поля в вакууме-это вектор, который направлен в том же направлении, что и вектор магнитной индукции, но отличается от него во  $\mu_0$  раз. Напряженность магнитного поля также измеряется в [А/м], как и размер вектора намагниченности. Напряженность магнитного поля с индукцией  $B = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Тл}$  будет равна  $H = 1 \text{ А/м}$ .

Из приведенных выше уравнений  $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{j}$  и  $\vec{H} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0}$  формул можно составить следующую формулу:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{j} \quad (29.10)$$

В большинстве магнетиков,  $\vec{j}$  и  $\vec{B}_0$  поскольку векторы являются направлены в одном направлении, эти магнетики усиливают внешнее поле.

*Магнитная восприимчивость и магнитно проницаемость:*

Из опытов видно, что если среда изотропна, то в произвольной точке магнетика  $\vec{j}$  и  $\vec{H}$  векторы имеют связь, которая выглядит следующим образом:

$$\vec{j} = \chi_m \vec{H} \quad (29.11)$$

Здесь  $\chi_m$  – величина, указывающая на магнитные свойства магнита, называется магнитной восприимчивостью.  $\vec{j}$  и  $\vec{H}$  поскольку векторы являются размерными величинами,  $\chi_m$  являются безразмерными величинами.  $\chi_m$  имеет положительные и отрицательные значения. А векторы у магнитов, которые параллельны,  $\vec{j}$  и  $\vec{H}$  у проводников  $\chi_m > 0$ , которые антипараллельны  $\chi_m < 0$ .

Мы можем определить эквивалентность между векторными простривствами  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$ , поместив приведенную выше формулу  $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{j}$  в формулу  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$ .

$$\vec{B} = (1 + \chi_m) \mu_0 \vec{H} = \mu \mu_0 \vec{H} \quad (29.12)$$

Здесь:  $\mu = 1 + \chi_m$  – так называемая относительная магнитная проницаемость среды, которая является безразмерной величиной. Эта величина указывает, во сколько раз магнит усиливает магнитное поле

относительно вакуума. Учитывая  $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$ , что приведенная выше формула может быть записана следующим образом:

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H} = \mu \vec{B}_0 \quad (29.13)$$

В изотропных средах вектор имеет ту же ориентацию, что  $\vec{H}$  и  $\vec{B}$  вектор, а в количественном отношении они отличаются  $\mu \mu_0$  раз. Следовательно, поскольку магнитная среда усиливает магнитную индукцию во  $\mu$  раз.

Из приведенных выше формул видно, что если напряженность магнитного поля для вакуума  $\vec{H} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0}$ , то для магнетика

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu \mu_0} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0}, \text{ то есть, то же самое, что и для вакуума.}$$

Следовательно, магнитное напряжение будет одинаковым в вакууме и магнитной среде, то есть до тех пор, пока магнитная среда не сможет изменить магнитное напряжение.

Таким образом, напряженность магнитного поля характеризует только вакуум, тогда как индукция магнитного поля характеризует вакуум и магнитную среду.

#### Значение напряженности и индукции магнитного поля:

Магнитная индукция говорит о том, насколько плотно, плотно расположены магнитные линии. Там, где значение магнитной индукции велико, индукционные линии также будут расположены более плотно. Другими словами, магнитная индукция прямо пропорциональна числу линий, проходящих перпендикулярно через  $1 \text{ см}^2$  поверхности, т. е.  $B = \frac{\Delta N}{\Delta S}$  будет.

Предположим, что индукция  $B_1 = 1 \text{ Тл}$ . предпологая, что линии индукции  $\Delta N_1 = 1 \text{ млн.}$  пересекаются, индукция  $B_2 = 2 \text{ Тл}$ , а в другой точке  $\Delta N_2 = 2 \text{ млн.}$  линии индукции пересекаются.

Точно так же, как магнитная индукция, напряженность магнитного поля указывает, насколько плотно, перпендикулярно расположены линии напряженности. Там, где значение магнитного напряженности велико, линии напряженности также будут расположены более плотно. Другими словами, магнитное напряжение прямо пропорционально количеству линий, проходящих вертикально через  $1 \text{ см}^2$  поверхности, т. е.  $H = \frac{\Delta N}{\Delta S}$  будет.

Предположим, что в точке с напряженностью  $H_1 = 1 \text{ Ам}$  через каждые  $1 \text{ см}^2$  поверхности в перпендикулярном положении  $\Delta N_1 = 1 \text{ трин.}$  Предполагая, что эти линии напряженности пересекаются, в то время как в другой точке с напряженностью  $H_2 = 1 \text{ Ам}$ , через каждые  $1 \text{ см}^2$  в

перпендикулярном положении  $\Delta N_2 = 2 \text{ трин.}$  линии напряженности пересекаются.

В точке, где значения магнитной индукции и напряженности больше, линии индукции и напряженности также будут более четкими. Поэтому эффект поля в этой точке также будет сильнее. Там, где линии напряженности и индукции стучат и рассеиваются, поле также становится мутным. Там, где линии напряженности и индукции собираются и накапливаются, поле также становится напряженным. В то время как линии напряженности и индукции параллельны, изменения поля не происходят, и это поле называется однородным полем.

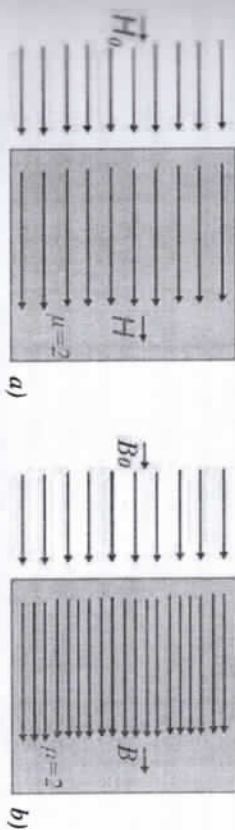


Рисунок 29.1-г/ам

Поскольку магнитная среда не изменяет значения напряженности, плотность линий напряженности также не изменяется при переходе от вакуума к среде. Число линий напряженности в вакууме  $\Delta N_1 = 10 \text{ трин.}$  если в магнитных средах, где магнитное проницаемость равна  $\mu$  то число линий напряженности равна  $\Delta N_2 = 10 \text{ трин.}$  то есть не меняется (рис.25.1-а).

Поскольку магнитная среда изменяет значение магнитной индукции в  $\mu$  раз, плотность линий индукции также изменяется в  $\mu$  раз при переходе от вакуума к среде. Число линий магнитное вектор индукции в вакууме  $\Delta N_1 = 10 \text{ трин.}$  если магнитной проницаемости равна  $\mu = 2$ , в магнитной среде число индукционных линий равна  $\Delta N_2 = \mu \Delta N_1 = 20 \text{ трин.}$  т. е. индукционные линии будут уплотняться (рис.29.1-б).

#### Вопросы по теме:

1. Чему равна сумма моментов результирующего магнитного поля внутри магнита? Какой суммой моментов равен суммарный магнитный момент в атоме?
2. Что называется вектором намагниченности? Назовите его формулу и единицу измерения.
3. Дайте определение понятию магнитная восприимчивость. Напишите формулу.
4. Дайте определение понятию диэлектрической проницаемости. Напишите формулу.

5. Напишите формулу, связывающую величину магнитной восприимчивости и диэлектрической проницаемости.
6. Напишите формулу, связывающую магнитную индукцию и напряженность магнитного поля.
7. Объясните, что такое магнитная индукция и напряженность магнитного поля (вакуум или среда). Опишите их физические значения.

**Решение задачи:**

1. Магнитный дипольный момент атома железа составляет около  $p_0 = 2,1 \cdot 10^{-23}$  А·м<sup>2</sup>. Вычислите: а) максимальный магнитный момент домена, состоящего из  $N = 10^{19}$  атомов; б) вектор поляризации для этого домена; в) какой должна быть сила тока в кольце диаметром 1 см, чтобы он был равен магнитному моменту этого домена?

**Дано**

$p_0 = 2,1 \cdot 10^{-23}$  А·м<sup>2</sup>  
 $d = 1$  см;  $N = 10^{19}$   
 $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>  
 $M = 56$  г/моль

**Решение**

а) для начала определим максимальный магнитный момент домена. Общий магнитный момент домена достигает максимального значения, когда частные магнитные моменты каждого атома в домене направлены одинаково.

а)  $\Delta p = N p_0 = 10^{19} \cdot 2,1 \cdot 10^{-23}$  А·м<sup>2</sup> =  $2,1 \cdot 10^{-4}$  А·м<sup>2</sup>

б)  $J = ?$       б) Определим, какой объем занимает домен, состоящий из  $10^{19}$  атомов железа.

$$\Delta V = \frac{m}{\rho} = \frac{m_0 N}{\rho N_A} = \frac{(56 \cdot 10^{-3} \text{ кг / моль}) \cdot 10^{19}}{(7800 \text{ кг / м}^3) \cdot 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} \approx 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$$

Теперь определим средний вектор поляризации для этого объема.

$$J = \frac{\Delta p}{\Delta V} = \frac{2,1 \cdot 10^{-4} \text{ А} \cdot \text{м}^2}{1,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3} = 1,75 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

с) определим силу тока в кольце, эквивалентную магнитному моменту, создаваемому этим доменом

$$\Delta p = IS = \pi r^2 I = \pi \frac{d^2}{4} I \rightarrow I = \frac{4 \Delta p}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot (2,1 \cdot 10^{-4} \text{ А} \cdot \text{м}^2)}{3,14 \cdot (10^{-2} \text{ м})^2} = 2,674 \text{ А}$$

Ответ: а)  $\Delta p = 2,1 \cdot 10^{-4}$  А·м<sup>2</sup>; б)  $\Delta V = 1,2 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>; с)  $I = 2,674$  А

2. Сердечник соленоида, заполненный воздухом, имеет магнитную индукцию 1,5 Тл. На сколько уменьшается магнитная индукция, если не изменять ток, проходящему через соленоид, отсасывая воздух из его сердечника?

**Дано**

$B = 1,5$  Тл  
 $\chi = 3,8 \cdot 10^{-7}$

**Решение**

Воздух является парамагнетиком, то есть парамагнитное вещество лишь слегка усиливает внешнее магнитное поле. Магнитное поле в проводнике, когда магнитное вещество находится внутри соленоида

$$B = (1 + \chi) \mu_0 H$$

с формулой определяется, когда вещества нет

$$B_0 = \mu_0 H$$

При всасывании воздуха магнитная индукция уменьшается до величины, равной их разности.

$$\Delta B = B - B_0 = (1 + \chi) \mu_0 H - \mu_0 H = \chi \mu_0 H = \chi B_0 = \frac{\chi}{1 + \chi} B = \frac{3,8 \cdot 10^{-7}}{1 + 3,8 \cdot 10^{-7}} \cdot 1,571 \approx 3,8 \cdot 10^{-7} \cdot 1,571 = 5,7 \cdot 10^{-7} \text{ Тл}$$

Ответ:  $\Delta B = 3,8 \cdot 10^{-7}$  Тл

**§ 30. МАГНЕТИКИ И ИХ ВИДЫ.**

Магнитные свойства магнетиков:

Магнетики бывают 3 типов в зависимости от их магнитных свойств: 1) диамагнетики; 2) парамагнетики; 3) ферромагнетики.

**1) Диамагнетики.**

Явление, при котором электрон, совершая круговое движение по орбите, под действием внешнего магнитного поля приобретает дополнительный магнитный момент  $\vec{B}$ , направленный против внешнего вектора  $\Delta \vec{p}$ , называется диамагнитным эффектом.

Магнитные моменты атомов магнетиков равны нулю, а магнитные моменты электронов, сохранившись в этих атомах, компенсируют друг друга, когда на них не действует внешнее магнитное поле. А при воздействии поля, вследствие диамагнитного эффекта, в результате добавления дополнительных магнитных моментов, которые получают некоторые электроны в структуре атомов, в атоме возникает магнитный момент, направленный против внешнего магнитного поля. В результате магнитные моменты атомов складываются и несколько ослабляют внешнее магнитное поле.

В диамагнетиках магнитная восприимчивость отрицательна ( $\chi_s < 0$ ). Например, для воды он равен  $\chi_s = -9 \cdot 10^{-6}$ . Магнитная восприимчивость

Других диамагнетиков также будет вокруг этого. Относительная магнитная проницаемость диамагнетиков, однако, немного меньше единицы, т. е.  $\begin{cases} \mu < 1 \\ \mu \approx 1 \end{cases}$ .

В диамагнетиках величина магнитной восприимчивости не изменяется с повышением температуры (рис.30.1-а).

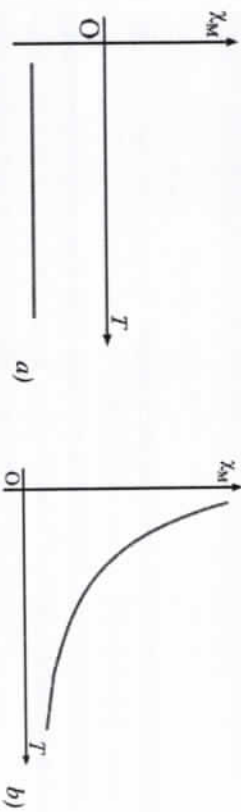


Рисунок 30.1

### 2) Парамагнетик:

Если при отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов вещества отличаются от нуля, то при размещении таких веществ в магнитном поле магнитные моменты атомов стремятся упорядочиться поле. Такое явление называется парамагнитным эффектом. Следовательно, в результате парамагнитного эффекта должно наблюдаться некоторое усиление внешнего поля. Тепловое движение, однако, имеет тенденцию нарушать упорядоченное расположение (парамагнитный эффект). Чем выше температура, тем выше магнитные моменты атомов, препятствующие упорядоченному расположению. Так, в веществах, называемых парамагнетиками, с повышением температуры значение магнитной восприимчивости уменьшается (рис.30.1-б).

$$\chi_s = \frac{C}{T} \quad (30.1)$$

где:  $C$  – постоянная для данного парамагнетика и называется постоянной Кюри. При очень низких температурах происходит отклонения от вышеуказанного закона Кюри.

Диамагнетический эффект наблюдается и у парамагнетиков, но значительно медленнее, чем парамагнетический эффект. Следовательно, результирующий эффект парамагнитного эффекта является доминирующим.

У парамагнетиков магнитная восприимчивость положительна ( $\chi_m > 0$ ). Например, для воздуха он равен  $\chi_m = 3,8 \cdot 10^{-7}$ . Магнитная восприимчивость

других парамагнетиков также будет вокруг этого. Относительная магнитная проницаемость парамагнетиков, однако, немного больше единицы, т. е.  $\begin{cases} \mu > 1 \\ \mu \approx 1 \end{cases}$ .

### 3) Ферромагнетик:

Магнетики третьего типа, резко отличающиеся по своим магнитным свойствам от диамагнетиков и парамагнетиков, называются ферромагнетиками. Это свойство было названо так потому, что оно было впервые обнаружено в железе и его сплавах (Ферри – означает латинское железо). Для ферромагнетиков можно перечислить следующие свойства:

а) Для ферромагнетиков величина магнитной восприимчивости  $\chi_s$  является величиной внешнего магнитного поля, очень быстро возрастающей в зависимости от  $H$  (рис.30.2). После достижения максимума, когда внешнее поле снова усиливается, происходит уменьшение значения  $\chi_m$ . У всех ферромагнетиков средние значения  $\mu$  во внешнем магнитном поле  $\mu$  намного (больше единицы, то есть они во много раз усиливают внешнее магнитное поле.

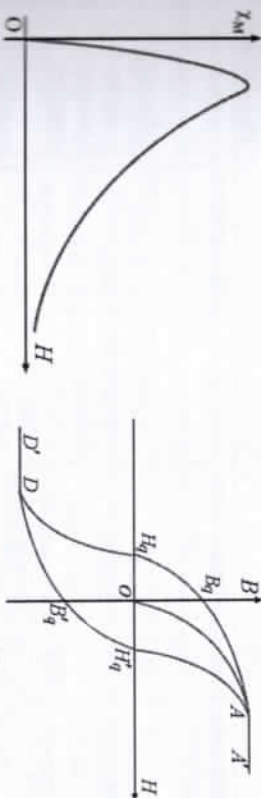


Рисунок 30.2

Рисунок 30.3

б) Зависимость индукции магнитного поля внутри ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля возрастает по кривой  $OA$  на рис.30.3. При дальнейшем увеличении напряженности поля, без увеличения магнитной индукции, изменяется по горизонтальной линии  $AA'$ , в направлении от точки  $A$  наблюдается насыщение магнитной индукции.

Теперь, если мы уменьшим напряженность поля до нуля, кривая  $AO$  вместо этого уменьшится на кривой  $AB_q$ . Остаточная магнитная индукция сохраняется в количестве, равном  $OB_q$  при  $H=0$ . Это означает, что остаточная индукция существует внутри ферромагнетика, даже когда внешний магнит полностью отключен. А чтобы полностью исключить магнитную индукцию внутри ферромагнетика, напряжение внешнего поля должно быть направлено в противоположную сторону на величину равную  $OH_q$ . При дальнейшем увеличении напряженности поля в обратном направлении магнитная индукция вдоль кривой  $H_qD$  также увеличивается в противоположном

направлении. Но, начиная с точки  $D$ , происходит насыщения магнитной индукции. При дальнейшем увеличении напряженности индукция идет по горизонтальной линии  $DD'$ .  $AB, H, D, H', A$  кривая возникает при изменении величины и направления напряженности внешнего поля. Эта замкнутая линия называется петлям гистерезиса. Поверхность поверхностного слоя гистерезиса равна работе, выполняемой при намагничивании ферромагнетика. Поверхностный ток гистерезиса является магним ферромагнетиком, если он узкий (поверхность мала), средним ферромагнетиком, если он средний (поверхность средней), и твердым ферромагнетиком, если он толстый (поверхность большой).

в) Для каждого ферромагнетика существует температура, называемая температурой Кюри ( $T_K$ ), при которой ферромагнетик терчет свою ферромагнетичность. Значение температуры Кюри равно:

$$T_K = 1043 \text{ K } (t = 770^\circ \text{C}) \text{ для железа, } T_K = 631 \text{ K } (t = 358^\circ \text{C}) \text{ для никеля, } T_K = 1394 \text{ K } (t = 1121^\circ \text{C}) \text{ для кобальта, } T_K = 317 \text{ K } (t = 44^\circ \text{C}) \text{ для гадолиния и } T_K = 317 \text{ K } (t = 44^\circ \text{C}) \text{ для оксида железа (FeO}_2\text{)}.$$

30.1-таблица

Ферромагнетик	$\mu$	Парамагнетик	$\mu$	Диамгнетик	$\mu$
Сталь	8000	Азот	1,00000000013	Водород	0,9999999937
Никель	25000	Воздух	1,000000038	Вода	0,999991
Кобальт	25000	Кислород	1,0000019	Висмут	0,999824
Ферриты	25000	Алюминий	1,000023	Поваренная соль	0,999987
		Вольфрам	1,000175	Золото	0,999963
		Марганец	1,00038	Кварц	0,999985
		Олово	1,0000044	Мель	0,999991
		Платина	1,000366	Свинец	0,999987
		Палладий	1,000692	Серебро	0,999981
		Эбонит	1,000014	Стекло	0,999987

При температуре выше температуры Кюри все ферромагнетики становятся парамагнетиками. В результате получается зависимость магнитной восприимчивости образующегося парамагнетика от температуры, меняемая по формуле:

$$\chi_m = \frac{C}{T - T_K} \quad (30.2)$$

Где:  $C$  — постоянная Кюри, что соответствует условию в  $T > T_K$ . Парамагнетизм обычных парамагнетиков начинается с температуры  $0 \text{ K}$ , тогда как парамагнетизм ферромагнетиков начинается с температуры Кюри  $T_K$ .

В таблице 30.1 приведены образцы относительных магнитных проницаемости магнетиков.

**Вопросы по теме:**

1. Сколько существует различных типов магнитов?
2. Для парамагнетиков  $\chi$  и  $\mu$  подставьте в каком порядке будут значения величин.
3. Для диамгнетиков и опишите в каком порядке будут значения величин  $\chi$  и  $\mu$ .
4. Для ферромагнетиков и подставьте в каком порядке будут значения величин  $\chi$  и  $\mu$ .
5. Какое график температурной зависимости диамгнетиков и парамагнетиков?
6. Какое график зависимости магнитной восприимчивости ферромагнетиков от напряженности внешнего поля?
7. Что такое температура Кюри? Может ли он быть ферромагнетиком при температуре выше этой температуры?

**Решение задачи:**

1. Через соленоид с железным кольцом с 10 обмотками в каждом сантиметре проходит ток 5 А. Если индукция магнитного поля в сердечнике соленоида равна 2 Тл, то чему равно значение  $\mu$  и  $\chi$ ?

**Дано**

$B = 2 \text{ Тл}$   
 $I = 5 \text{ А}$   
 $l = 1 \text{ см}$   
 $N = 10$

**Решение**  
 Воспользуемся формулой для определения магнитного поля в центре соленоида.

$$B = \mu_0 \mu_n I = \mu_0 \mu_n \frac{N}{l} \rightarrow \mu = \frac{Bl}{\mu_0 I N} = \frac{2 \text{ Тл} \cdot 10^{-2} \text{ м}}{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{А}} \cdot 5 \text{ А} \cdot 10} \approx 318$$

Теперь определим  $\chi$ .

$$\mu = 1 + \chi, \rightarrow \chi = \mu - 1 = 317$$

Ответ:  $\mu = 318$ ;  $\chi = 317$

**§ 31. МАГНИТНЫЙ ПОТОК. ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. ПРАВИЛО ЛЕНЦА.**

Индукция магнитного поля означала бы плотность линий индукции. Существует еще одна величина, обозначающая число полных индукционных линий, пересекающих поверхность, которую называют магнитным индукционным потоком.

**Нормаль поверхности и вектор поверхностности:**

Пусть задана поверхность произвольной формы. Проведем перпендикулярный вектор, перпендикулярный этой поверхности и направленный в сторону криволиней поверхности (вне кривизны) и

имеющий единичную длину ( $|\vec{n}|=1$ ). Этот вектор называется нормалью поверхности. Векторная величина, равная произведению нормали поверхности на поверхность, называется вектором поверхности (рис.31.1-а).

$$\vec{S} = S \cdot \vec{n}, \quad |\vec{n}| = 1$$

Вектор поверхности направлен в направлении выпуклости, как нормаль поверхности.

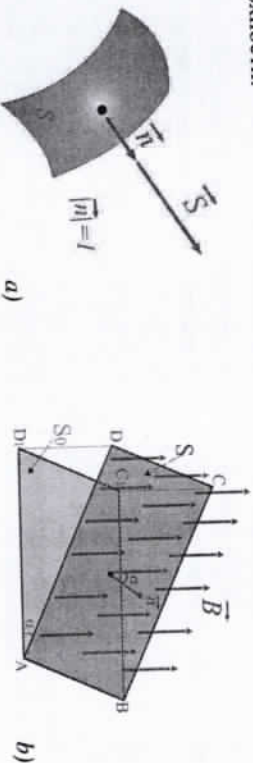


Рисунок 31.1-г-д-и

**Магнитный поток и его значение:**

Введем в магнитное поле плоскую поверхность произвольной формы с площадью  $S$ . Пусть угол между вектором индукции магнитного поля  $\vec{B}$  и нормалью поверхности равен  $\alpha$ . Скалярная величина, равная скалярному произведению вектора магнитной индукции и вектора поверхности, называется потоком магнитной индукции, проходящим через поверхность (рис.31.1-б).

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot (S \cos \alpha) = BS \cos \alpha \quad (31.1)$$

Здесь:  $\alpha = \vec{B} \wedge \vec{n}$  – угол между вектором индукции и нормалью поверхности.

Если поверхность перпендикулярна линиям индукции, то  $\alpha=0^\circ$ , что создает наибольший магнитный поток на поверхности  $\Phi_{\max} = BS$ .

Если поверхность параллельна линиям индукции, то  $\alpha=90^\circ$ , и на поверхности образуется наименьший магнитный поток  $\Phi_{\min} = 0$ .

Единица измерения тока магнитной индукции  $Bb$  (Вебер). Если контурную индукцию площадью  $1 \text{ м}^2$  провести перпендикулярно линиям индукции в магнитном поле  $1 \text{ Тл}$ , то на поверхности образуется магнитный индукционный поток  $1 \text{ Вб}$ .

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2 \quad (31.2)$$

Вильгельм Эдуард Вебер родился 24 октября 1804 года в Курфюршестве Саксония. Он окончил университет лгалле в 1826 и получил докторскую степень в том же году. С 1845 года и до конца жизни работал в Геттингенском университете. Вебер первым создал устройство электромагнитного телеграфа. Его основные работы были в области электричества и магнита. 1856 установил, что соотношение величин заряда в электрическом измерении и в магнитном измерении равно скорости света. Вебер установил, что взаимодействие двух движущихся зарядов зависит не только от величины заряда, но и от скорости движения зарядов. Был сторонником принципа дистанционного взаимодействия. В настоящее время единица измерения тока магнитной индукции носит имя Вебера. Он умер в 1891 году в Геттингене, Германия, в возрасте 86 лет.



Вильгельм Эдуард Вебер (1804-1891)

Давайте количественно оценим поток магнитной индукции. В предыдущих темах мы познакомились с тем, что магнитная индукция означает плотность линий индукции  $B = \frac{\Delta \Phi}{\Delta S}$ . Исходя из формулы  $\Phi = BS$ ,

поток магнитной индукции представляет собой число полных линий индукции, проходящих через поверхность, т. е. Будет  $\Phi = \Delta \Phi$ . Предположим, что в точке с индукцией  $B = 1 \text{ Тл}$  каждые  $1 \text{ см}^2$  поверхности перпендикулярны  $N = 1 \text{ млн}$ . Предполагая, что эти индукционные линии пересекают, мы получаем, что  $S = 15 \text{ см}^2$  поверхности, перпендикулярной линиям индукции, составляет  $N_{\text{обд}} = 15 \text{ млн}$  пересекаются индукционными линиями. Но на самом деле невозможно сосчитать количество индукционных линий. Эрстед определил в 1821 г. в результате своих опытов электрический ток создает вокруг себя магнитное поле.

Английского физика Майкла Фарадея интересовал вопрос о том, является ли это обратным процессом, то есть магнитное поле не может генерировать электрический ток. Лишь спустя 10 лет, опираясь на свои опыты, он открыл явление электромагнитной индукции и открыл закон электромагнитной индукции.

**Явления электромагнитной индукции:**

На свободном вращающемся стержне на игле крепятся две алюминиевые петли. Пусть одно из колец будет замкнутым, а другое-кольцо с разрезом. Когда мы приблизим магнитный стержень к замкнутому кольцу, кольцо отталкивается от него и вращается (рис.31.2-а). А при приближении кольца с разрезом ничего не происходит (рис.31.2-б). Мы можем объяснить причину, по которой кольцо отталкивается от магнита, когда замкнутое приближает магнит к кольцу следующим образом:

Когда магнит приближается, в замкнутое кольцо возникает некоторый ток, и этот ток создает вокруг себя вторичное поле  $B'$ . Поскольку поле  $B'$  направлено в противоположную сторону от поля  $B$ , они отталкиваются (рис.31.2-а). При приближении магнита к кольцу с разрезом ток не может образовываться, а только кольцо заряжено противоположно, т. е. между точками обрыва образуются потенциалы (рис.31.2-б).

Теперь, когда магнит, находящийся возле замкнутого кольца, отталкивается стержень от кольца, Кольцо притягивается к магниту и следует за ним, т. е. в этом случае кольцо поворачивается в противоположную сторону (рис.31.2-в). А при удалении кольца от кольца с разрезом ничего не происходит (рис.31.2-д). Мы можем объяснить причину, по которой кольцо притягивается к магниту и следует за ним, когда замкнутое кольцо отталкивает магнит от кольца следующим образом:

Когда магнит удаляется, в замкнутом кольце возникает некоторый ток, и этот ток создает вокруг себя вторичное поле  $B'$ . Так как поле  $B'$  совпадает с полем  $B$ , то рисунок (рис.31.2-в). При удалении магнита от кольца с разрезом ток не может образовываться для кольца с разрезом, а только кольца заряжается с противоположным зарядом, т. е. между точками обрыва образуются потенциалы (рис.31.2-д).

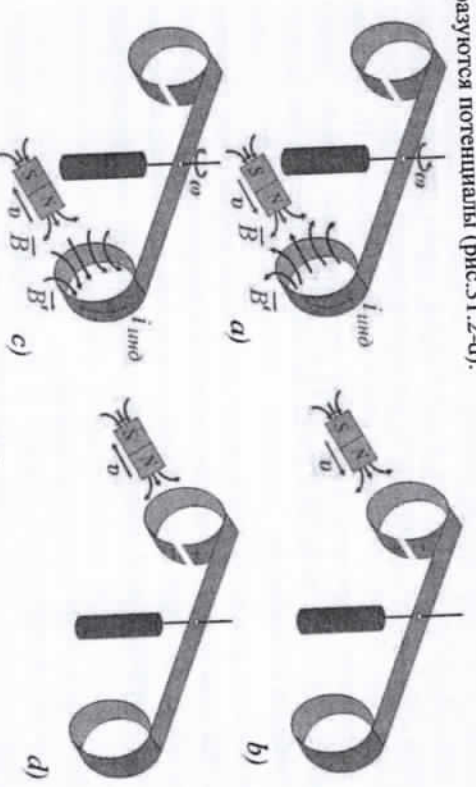


Рисунок 31.2-г-asm

Явление образования тока в контуре при изменении магнитного потока (числа линий индукции), пересекающего поверхность замкнутого контура (или катушки провода), называется явлением электромагнитной индукции. Генерируемый ток называется индукционным током.

Предположим, что полюс магнитного стержня составляет всего  $N=10$  *млрд* частицы исходят от линий магнитной индукции. Магнитный стержень при удалении от кольца образует поверхность кольца  $N_1=1$  *млрд*. Линии магнитной индукции, а при приближении к кольцу  $\Delta N_2=N=10$  *млрд*. пересекаются линиями магнитной индукции. При этом число магнитных линий, пересекающих поверхность контура  $\Delta N=9$  *млрд*. изменяется (увеличивается или уменьшается). Когда магнитный стержень приближается к кольцу  $\Delta N=9$  *млрд*. количество магнитных линий, пересекающих поверхность, увеличивается.

В то время как магнитный стержень отдалится от кольца,  $\Delta N=-9$  *млрд*. уменьшается количество магнитных линий, пересекающих поверхность. Если изменение числа этих силовых линий, проходящих через поверхность, происходит в момент  $t$  (приближение или удаление магнитного стержня от кольца в момент  $t$ ), то в контуре возникает ток  $i$ , а если изменение числа силовых линий происходит в момент  $t/2$  (приближение или удаление магнитного стержня от кольца в момент  $t/2$ ), то в контуре возникает ток  $2i$ . Чем больше индукционный ток генерируется в контуре, тем сильнее его вторичное поле  $B'$ , и тем сильнее его взаимодействие (притяжение или отталкивание) с основным полем  $B$ .

Иными словами, чем быстрее и интенсивнее изменяется (увеличивается или уменьшается) магнитный поток (число линий индукции), пересекающий контур, тем больший индукционный ток образуется в контуре. Вращение, создаваемое этим индукционным током, также является настолько сильным, и чем сильнее магнит отталкивается от приближающегося стержня или тем сильнее притягивается к удаляющемуся стержню.

**Правило Ленца:**

Направление индукционного тока, возникающего в обмотанном катушкой проводе, можно было определить по отклонению стрелки гальванометра. Относительно направления индукционного тока в 1834 году петербургский академик Эмиль Христианович Ленц проводил опыты и на основании результатов экспериментов открыл правило определения направления индукционного тока. Направление возникающего в контуре индукционного тока определяется на основании правила Ленца.

*Индукционный ток, возникающий в замкнутом контуре, направляет своим образом, что магнитное поле, создаваемое индукционным током, препятствует любым изменениям внешнего магнитного потока.*

Следовательно, индукционный ток направляет таким образом, что его магнитное поле стремится не увеличивать при увеличении числа пересекающих контур линий магнитной индукции (для этого Магнит не

отпускает стержень на сближение, отталкиваясь от него), а при уменьшении числа линий магнитной индукции стержень не уменьшится (для этого магнит не отпускает стержень на сближение, отталкиваясь от него). Таким образом, вторичное поле  $B'$ , порождаемое индукционным током, стремится не изменять взаимное положение контура и магнитного стержня. Потому что магнитный поток, проходящий через контур, не изменяется, пока не изменится их относительное положение.



Рисунок 31.3

Для определения направления индукционного тока проведем следующие работы (рис. 31.3):

- 1) определяется, увеличивается ли магнитный поток  $\Delta\Phi > 0$  или уменьшается  $\Delta\Phi < 0$ ;
- 2) определим направление поля  $B'$ , образованного индукционным током. Для этого, когда  $\Delta\Phi > 0$ , поле  $B'$  будет направлено против поля  $B$ , а когда  $\Delta\Phi < 0$ , поле  $B'$  будет направлено в направлении, соответствующем полю  $B$ ;
- 3) зная направление поля  $B'$ , по правилу правой пары находят направление индукционного тока  $I_{ind}$ .

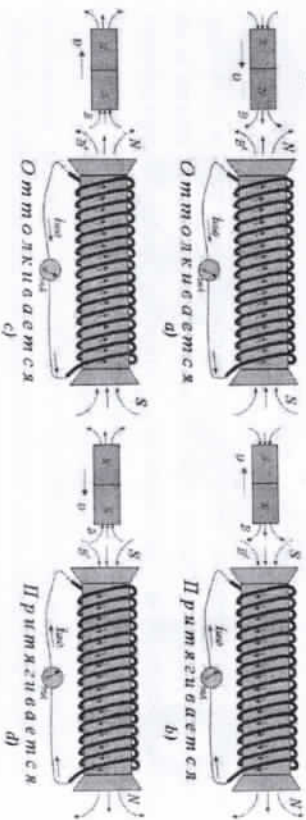


Рисунок 31.4

Направления индукционного тока, полюса катушки и явления притяжения-отталкивания при приближении или удалении магнита к катушке с ее различными полюсами изображены на рисунке 31.4 выше.

Вопросы по теме:

1. Что называется магнитным потоком? Назовите его единицу измерения и дайте определение единице.
2. Когда магнитный поток будет максимальным или минимальным?
3. Что такое явление электромагнитной индукции?
4. Оппишите правило Ленца. По нему определите направление индукционного тока, образующегося в контуре.
5. Как движется индукционный ток, когда провод приближает магнит к катушке? Катушка и магнит притягиваются или отталкиваются в этот момент?
6. Как движется индукционный ток, когда провод отталкивает магнит от катушки? Катушка и магнит притягиваются или отталкиваются в этот момент?

Решение задач:

1. Круговая поверхность радиусом 5 см находится в однородном магнитном поле с индукцией 2 Тл. Вектор индукции образует угол  $0^\circ$  с нормалью поверхности окружности. Найдите магнитный поток, пересекающий поверхность (мВб).

- A) 3,14 B) 10 C) 30,5 D) 15,7 E) 8

Решение

Дано:  $R = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$

$B = 2 \text{ Тл}$

$\alpha = 0^\circ$

$F - ?$

1)  $F = BScos\alpha$

2)  $F = 2 \cdot 3,14 \cdot (5 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 2 = 15,7 \text{ мВб}$

Ответ: D) 15,7 мВб



§ 32. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И ЕГО РАЗЛИЧНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ.

М.Фарадей, опираясь на свои опыты, в 1831 году сформулировал закон электромагнитной индукции для количественной оценки электромагнитной индукции.

Закон электромагнитной индукции:

Индукционный ЭДС, образующийся в замкнутом контуре, пропорционален скорости изменения потока магнитной индукции, проходящего через поверхность, ограниченную этим контуром.

$$\epsilon_{ind} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \text{или} \quad \epsilon_{ind} = -\dot{\Phi} \quad (32.1)$$

Согласно закону электромагнитной индукции, если магнитный поток увеличивается ( $\Delta\Phi > 0$ ), в контуре возникает отрицательная индукция ЭДС, и наоборот, если магнитный поток уменьшается ( $\Delta\Phi < 0$ ), в контуре возникает положительная индукция ЭДС. Если магнитный поток изменяется



равномерно, то величина индукционного ЭДС, создаваемого в проволочной рамке, будет постоянной (рис.32.1).

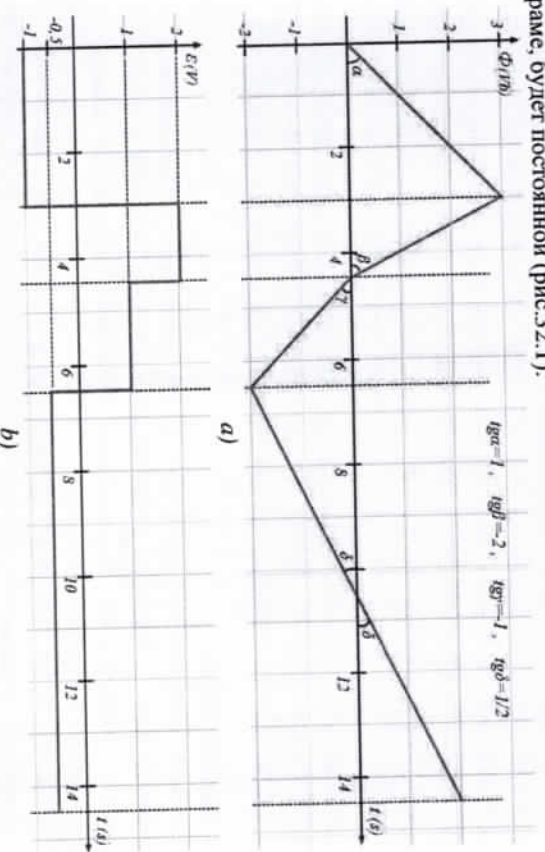


Рисунок 32.

Из приведенного выше рисунка также видно, что на графике, связанном с магнитным потоком и временем ( $\Phi = \Phi(t)$ ), тангенс угла, образованный графиком с горизонтом, будет в количественном отношении равен индукции, создаваемой контуром ЭДС.

Если одна из величин в формуле  $\Phi = BS \cos \alpha$ , записанной для магнитного потока, изменяется во времени, то из закона электромагнитной индукции следует другая частная формула.

Если изменяется во времени только магнитное поле, то закон электромагнитной индукции принимает следующий вид:

$$\varepsilon_{\text{инд}} = -\dot{\Phi} = -S \cos \alpha \frac{dB}{dt} \quad (32.2)$$

Если изменяется во времени только величина контурной поверхности, то закон электромагнитной индукции принимает следующий вид:

$$\varepsilon_{\text{инд}} = -\dot{\Phi} = -B \cos \alpha \frac{dS}{dt} \quad (32.3)$$

Если поверхность  $S$  вращается вокруг оси, перпендикулярной этой поверхности, по закону  $\alpha = \omega t$ , то закон электромагнитной индукции принимает следующий вид:

$$\varepsilon_{\text{инд}} = -\dot{\Phi} = -BS \frac{d(\cos \omega t)}{dt} = BS \omega \sin \omega t \quad (32.4)$$

Если известно электрическое сопротивление контура, то также можно будет определить величину индукционного тока.

$$i_{\text{инд}} = \frac{\varepsilon_{\text{инд}}}{R} = -\frac{1}{R} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad \text{или} \quad i_{\text{инд}} = -\frac{\dot{\Phi}}{R} \quad (32.5)$$

Поскольку индуцированный ток появляется в контуре из-за явления электромагнитной индукции, это означает, что также происходит смещение заряженных частиц в одну направлении. В результате через поверхность поперечного сечения контура через некоторый предельный интервал  $\Delta t$  протекает заряд  $\Delta q$ . Его можно найти, вычислив количество протекающего заряда.

Величина заряда, протекающего через поперечное сечение контура, будет:

$$\Delta q_{\text{инд}} = \int_0^t i_{\text{инд}} dt = -\frac{1}{R} \int_0^t d\Phi = -\frac{\Delta \Phi}{R} \quad (32.6)$$

Теперь познакомимся с некоторыми частными случаями закона электромагнитной индукции.

#### *Вращающаяся проволока в магнитном поле индуцирует ЭДС в рамке:*

Пусть поверхность, введенная в магнитное поле, намотана на катушку проволокой и эта катушка движется вокруг своей оси по закону  $\alpha = \omega t$ . Поскольку магнитный поток (число магнитных силовых линий), проходящий через поперечное сечение катушки, изменяется, то в катушке по закону электромагнитной индукции возникает ЭДС индукции (рис.28.2). Возникающую индукционную ЭДС можно определить с помощью закона электромагнитной индукции. Поскольку катушка вращается в магнитном поле, магнитный поток, проходящий через катушку, со временем периодически изменяется по закону  $\Phi = BS \cos \omega t$ . Когда набор катушек вращается в магнитном поле, в каждой катушке индуцируется ЭДС индукции  $\varepsilon_0$ . Это в то время как индукция ЭДС равно:

$$\varepsilon_0 = -\dot{\Phi} = -(BS \cos \omega t)' = BS \omega \sin \omega t$$

Общий ЭДС, который появляется на катушке равно:

$$\varepsilon_{\text{инд}} = N \varepsilon_0 = NBS \omega \sin \omega t = \varepsilon_{\text{макс}} \sin \omega t$$

Индукционный ЭДС так же, как и магнитный поток, является гармоническим кольцом, изменяющимся в соответствии с ним, за исключением того, что фаза колебаний отстает от фазы колебаний магнитного потока на  $\pi/2$ .

Таким образом, индукция ЭДС, возникающая на плоском вращающемся катушке, имеющей обмотку  $N$  из магнитного поля, оказывается следующей (рис. 32.2):

$$\boxed{\varepsilon_{ind} = NBS\omega \sin \omega t = \varepsilon_{max} \sin \omega t, \quad \varepsilon_{max} = NBS\omega} \quad (32.7)$$

Поскольку индукционный ток изменяется по гармоническому закону, сила индукционного тока также изменяется по гармоническому закону.

Уравнение изменения индукции ЭДС по времени, генерируемое на катушке, выглядит следующим образом:

$$\boxed{i_{ind} = \frac{\varepsilon_{ind}}{R} = \frac{NBS\omega}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t, \quad I_m = \frac{NBS\omega}{R}} \quad (32.8)$$

По мере вращения катушки в магнитном поле магнитный поток, проходящий через поперечное сечение катушки, циклически уменьшается и увеличивается. В соответствии с правилом Ленца индукционный ток направляет таким образом, что этот индукционный ток создает вторичное магнитное поле, которое препятствует увеличению при увеличении магнитного потока и уменьшению при уменьшении. Другими словами, вторичное поле стремится ограничить любое изменение магнитного потока. Поэтому для вращения катушки в магнитном поле работы должны выполнять внешние силы, то есть должен существовать внешний крутящий момент. Давайте посчитаем этот крутящий момент.

В предыдущих темах мы ознакомились, что когда провод, через который проходит постоянный ток  $I$ , вводится в постоянное магнитное поле  $B$ , в нем возникает крутящий момент  $M = BISSina$ . Где  $\alpha$  – угол между нормалью к поверхности проводочной рамки и внешним магнитным полем, изменяющийся по закону  $\alpha = \omega t$ , так как рамка в данном положении движется по прямой. При вращении проводочной рамки (катушки) с катушками в постоянном магнитном поле в катушке возникает индукционная ЭДС  $i_{ind} = \frac{NBS\omega}{R} \sin \omega t$ . Учитывая это, для вращения катушки в магнитном поле

$$M = BISS \sin \alpha = B i_{ind} S \sin \omega t = B \left( \frac{NBS\omega}{R} \sin \omega t \right) S \sin \omega t = \frac{N\omega}{R} B^2 S^2 \sin^2 \omega t$$

требуются крутящий момент, равный.

Таким образом, внешний крутящий момент, необходимый для равного вращения катушки в постоянном магнитном поле, будет следующим:

$$\boxed{M = \frac{N\omega}{R} B^2 S^2 \sin^2 \omega t = M_m \sin^2 \omega t, \quad M_m = \frac{N\omega}{R} B^2 S^2} \quad (32.9)$$

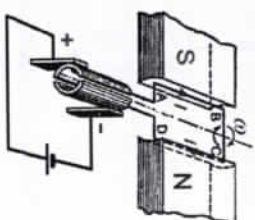


Рисунок 32.2

Графики магнитного потока ( $\Phi = \Phi(t)$ ), пересекающего плоскость рамки при вращении проводочной рамки в магнитном поле, индукционного ЭДС ( $\varepsilon_{ind} = \varepsilon(t)$ ), создаваемого в рамке, а также силы индукционного тока ( $i_{ind} = i(t)$ ) и внешнего крутящего момента ( $M = M(t)$ ), вращающего рамку, показаны на рисунке ниже.

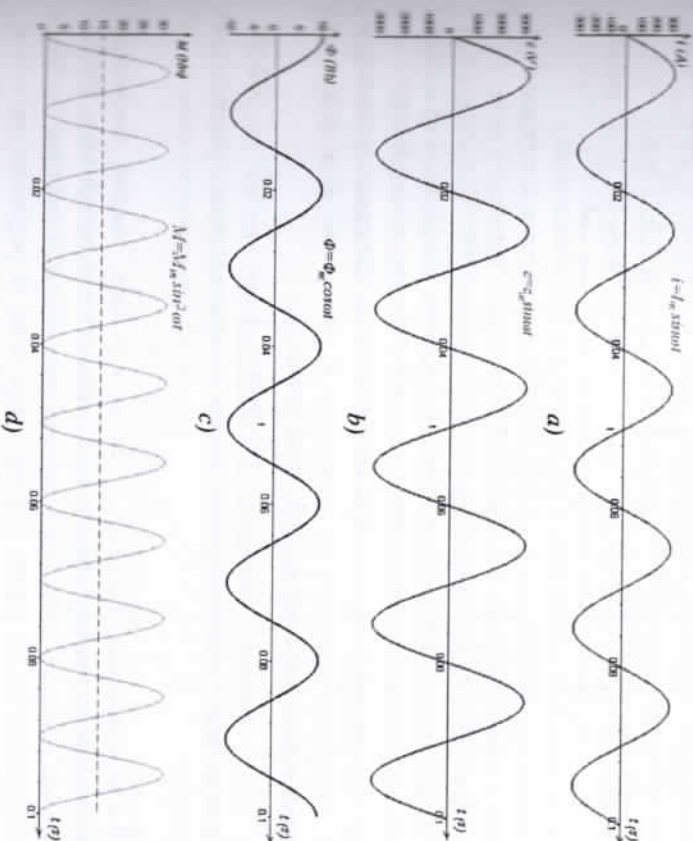


Рисунок 32.3

Приведенные выше графики приведены для случая, когда значения величин равны  $N = 100$ ,  $B = 17 \mu\text{T}$ ,  $S = 0,1 \text{ м}^2$ ,  $\omega = 100 \text{ рад/с}$ ,  $R = 10 \text{ Ом}$ .

Работу, выполняемую для скручивания рамки с током в магнитном поле, можно определить по формуле  $A = \int M(\varphi) d\varphi$ . Среднее значение крутящего момента за период

$$M = \frac{N\omega}{2R} B^2 S^2 \quad (32.10)$$

Предполагая, что при повороте рамки на произвольный угол  $\Delta\varphi$

$$A = M \cdot \Delta\varphi = \frac{N\omega}{2R} B^2 S^2 \cdot \Delta\varphi \quad (32.10a)$$

будет равно. Если рамка вращается целое число раз, то есть  $d\varphi=2\pi k$ , выполненная работа равно:

$$A = \frac{\pi k N \omega}{R} B^2 S^2 \quad (32.10b)$$

Таким образом, работа, выполняемая внешними силами для равномерного вращения проводящей рамки в магнитном поле, будет выглядеть следующим образом:

$$A = \frac{N \omega B^2 S^2 \cdot \Delta\varphi}{2R} \quad \text{или} \quad A = \frac{\pi k N \omega B^2 S^2}{R} \quad (32.11)$$

**Индукция ЭДС в проводнике, движущемся в магнитном поле:**

Опыты показывают, что даже если взять кусок проводника определенной длины и переместить его с неизменной скоростью в магнитном поле, то в этом проводнике будет образовываться индукционный ЭДС и индукционный ток по проводнику. В результате получается разность потенциалов на концах проводника. Давайте количественно вычислим этот индукционный ЭДС.

Если в магнитное поле с индукцией  $B$  включен проводник длиной  $\ell$ , и этот проводник движется со скоростью  $v$  под углом  $\alpha$  к полю, то индуцированная в проводнике ЭДС будет равна:

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = v \ell B \sin \alpha \quad (32.12)$$

Приведенную выше формулу можно доказать двумя различными способами:

**Способ 1**

Когда проводник движется в магнитном поле, каждый свободный электрон внутри этого проводника также движется в магнитном поле. На эти электроны действует сила Лоренца магнитным полем, и эта сила Лоренца концентрирует их на одной стороне проводника. В результате на одном конце проводника возникает отрицательный потенциал из-за избытка электронов, а на другом-положительный из-за недостатка электронов (рис.28.4-в). Ток разности потенциалов на концах проводника сохраняется до тех пор, пока сила Лоренца и Кулоновская сила, действующие на свободный электрон, взаимно не равняются ( $F_{\text{Л}} = F_{\text{Ку}}$ ). При перемещении свободного электрона, находящегося на одном конце проводника, сила Лоренца действует против силы Кулона на другой конец проводника, т. е. Работа будет равно:

$$A = F_{\text{Л}} \cdot \ell = F_{\text{Ку}} \cdot \ell = e \mathcal{E} B \sin \alpha \cdot \ell \quad (32.13)$$

Работа, выполняемая при перемещении заряда, и выражением ЭДС. т. е. индукция, возникающая в проводнике равно:

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = \frac{A}{e} = \frac{e \mathcal{E} B \sin \alpha \cdot \ell}{e} = v \ell B \sin \alpha \quad (32.13a)$$

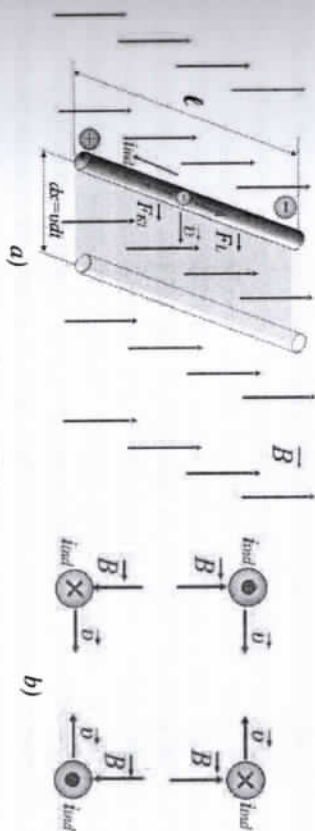


Рисунок 32.4  
Способ 2

Когда проводник движется в магнитном поле под углом  $\alpha$  к полю, через небольшой промежуток времени  $dt$  проводник перемещается на небольшое расстояние  $d\ell = v dt$  и рисует небольшую поверхность в магнитном поле, равную  $dS = \ell dx \sin \alpha = \ell v \sin \alpha dt$ . Магнитный поток, проходящий через эту поверхность равно:

$$d\Phi = B dS = v \ell B \sin \alpha dt \quad (32.14)$$

Согласно закону электромагнитной индукции, индукция ЭДС в количественом отношении равна скорости изменения магнитного потока. То есть значение индукции ЭДС равно:

$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{v \ell B \sin \alpha dt}{dt} = v \ell B \sin \alpha \quad (32.14b)$$

Следовательно, из вышеприведенной доказанной формулы видно, что при  $\alpha = 90^\circ$  в проводнике образуется наибольший ЭДС.

$$\mathcal{E}_{\text{max}} = v \ell B \quad (32.15)$$

На рис.32.4-б изображены направления индукционных токов, возникающих в проводнике. На рисунке длина проводника перпендикулярна направлению чертёжа. Направление индукционного тока, возникающего в проводнике, движущемся в магнитном поле, определяется по правилу левой руки.

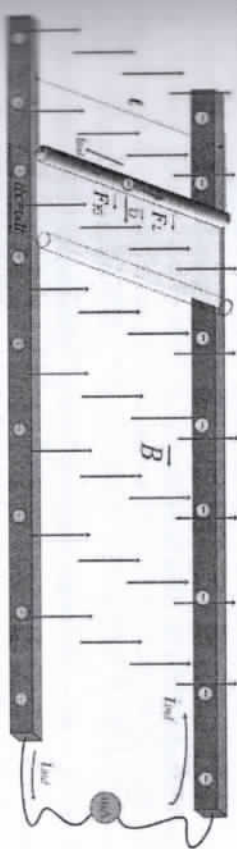


Рисунок 32.5

Если мы возьмем за левую руку так, чтобы наши четыре разведенных пальца указывали направление движения проводника, а магнитное поле проникло в нашу ладонь, то наш большой палец, повернутый к 90°, покажет направление индукционного тока.

Если на рисунке 32.5 концы проводника перемещать по параллельным проводящим рельсам, то одна из рельс будет заряжена знаком (-), а другая знаком (+), и разность потенциалов между рельсами будет равна  $\varphi_+ - \varphi_- = \mathcal{E}_{\text{инд}} = V \ell g \sin \alpha$ . Если к концам рейки подсоединить миллиамперметр, то в результате образования замкнутого контура возникнет циркуляционный ток в направлении против часовой стрелки. Поскольку этот ток генерируется отрицательными зарядами-электронами, движение электронов происходит по часовой стрелке.

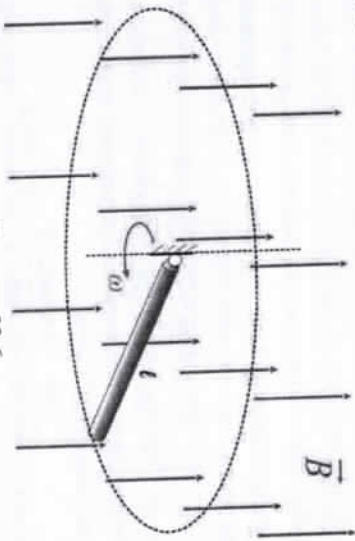


Рисунок 32.6

Оказывается, если повернуть проводник в магнитном поле вокруг оси, проходящей через один его конец, то на его концах возникнет разность потенциалов. Давайте посчитаем разность потенциалов (рис.32.6). Получаем элементарную длину на произвольном расстоянии от начала центра  $dr$ . Эта элементарная длина движется в магнитном поле со скоростью  $v = \omega r$ , которая практически неизменна. Это элементарная индукция, которая возникает в элементарной части ЭДС равно:

$$d\mathcal{E} = V \ell g \sin \alpha = V dr (\omega r) \sin \alpha = V \omega \sin \alpha r dr \quad (32.16)$$

Интегрируя это в интервал  $0 \leq r \leq \ell$ , мы находим значение индукции ЭДС, которое генерируется во всем проводнике.

$$\mathcal{E} = \int d\mathcal{E} = V \omega \sin \alpha \int_0^{\ell} r dr = V \omega \sin \alpha \frac{r^2}{2} \Big|_0^{\ell} = \frac{1}{2} V \omega \ell^2 \sin \alpha = V \frac{g_m}{2} \ell \sin \alpha \quad (32.16a)$$

Где:  $g_m = \omega \ell$  — линейная скорость конца проводника. Следовательно, оказывается, что значения ЭДС, которые генерируются при движении вперед со скоростью, будут равны между собой что значения ЭДС, которые

возникают при вращении проводника длиной  $\ell$  вокруг одного конца или при перемещении его вперед со скоростью  $\left( g = \frac{g_m}{2} \right)$ , равной скорости его середины, будут взаимно равны.

Таким образом, индукция, возникающая в проводнике при вращении проводника в пространстве вокруг одного конца с угловой скоростью  $\omega$ , введенной в магнитное поле  $\ell$ , будет равна:

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = \frac{1}{2} V \omega \ell^2 \sin \alpha = V \frac{g_m}{2} \ell \sin \alpha \quad (32.17)$$

На законе электромагнитной индукции основана работа всех современных электроприборов переменного тока, гидро-, тепловых и атомных электростанций, электродвигателей и генераторов, микрофонных и звуковых колонок и т. д.

Вопросы по теме:

1. Опишите закон электромагнитной индукции.
2. Индукция, которая образуется в контуре, показывает, когда знак ЭДС является положительным или отрицательным.
3. Запишите магнетическая вырешения закона электромагнитной индукции для случая, когда магнитная индукция, контурная поверхность и один из углов зависят от времени.
4. Напишите закон электромагнитной индукции для вращающейся проводящей рамки.
5. Напишите на вращающейся проводящей рамке уравнения зависимости магнитного потока, индукционного ЭДС и индукционного тока от времени и изобразите их графики.
6. Напишите уравнение зависимости крутящего момента, вращающегося проводящую рамку в магнитном поле, от времени.
7. Какую работу выполняет внешняя сила, чтобы повернуть проводящую рамку на произвольный угол в магнитном поле, за один оборот или за один оборот?
8. Чему равна индукционная ЭДС, возникающая в проводнике, движущемся прямолинейно по прямой в магнитном поле? Что делать, если проводник вращается прямо вокруг оси, проходящей через один конец?

Решение задач:

1. Прямой проводник длиной 0,3 м пересекает магнитное поле со скоростью 6 м/с под углом 30° к линиям индукции. Направление скорости перпендикулярно проводнику. Чему равна магнитная индукция поля (Тесла), если в проводнике индуцируемый ЭДС равен 3,6 В?

А) 1 В) 2 С) 3 Д) 4 Е) 6

Дано: Решение:

$$l = 0,3 \text{ м}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$\mu = 6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\epsilon = 3,6 \text{ В}$$

$$V = ?$$

- 1)  $\epsilon = Bl \sin \alpha$   
 2)  $V = \frac{\epsilon}{\mu \sin \alpha} = \frac{3,6}{6} \cdot 0,3 \cdot 0,5 = \frac{7,2}{1,8} = 4 \text{ Тл}$

Ответ: Д) 4 Тл

2. Грань кольца из проводника составляет 400 см<sup>2</sup>. Индукционная плоскость магнитного поля, пересекающая правую вертикальную плоскость, изменяется по закону  $V = 0,1 + 0,2 t$  т. Здесь величина  $V$  выражается в Теслах, а величина  $t$  - в секундах. Какой будет индукционная ЭДС (мВ), образующаяся в кольце?

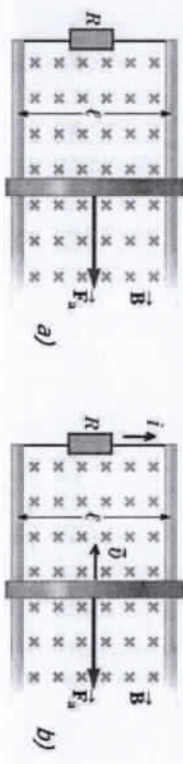
Дано:  
 $S = 100 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$   
 $V = 0,1 + 0,2t$

Решение:  
 Воспользуемся формулой закона электромагнитной индукции

$$\epsilon = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{dBS}{dt} = S \frac{dV}{dt} = 4 \cdot 10^{-2} \cdot 0,2 = 8 \text{ мВ}$$

Ответ: 8 мВ

3. На рисунке а показано направление силы Ампера, действующей на скользящий стержень на рельсах, расположенных в магнитном поле, направленном в сторону плоскости изображения. При этом электрическое сопротивление проводника  $R = 6 \text{ Ом}$ , длина стержня  $l = 1,2 \text{ м}$ , индукция магнитного поля  $V = 2,5 \text{ Тл}$  и результирующая сила тока  $i = 0,5 \text{ А}$ . На основании правила правой руки и Ленца укажите направление индуцированного тока, а также направление движения катушки. С какой скоростью движется стержень?



Дано:  
 $R = 6 \text{ Ом}$   
 $V = 2,5 \text{ Тл}$   
 $l = 1,2 \text{ м}$   
 $i = 0,5 \text{ А}$   
 $v = ?$

Решение:

Если мы по правилу левой руки держим левую руку так, чтобы магнитное поле проникло в нашу ладонь, сила Ампера была одинакова с силой большого пальца, то наши четыре разведенных пальца показывают ток, направленный вниз по стержню (рис.б). Другими словами,

индукционный ток сопротивлению, рельсы течет по стержню по часовой стрелке.

Ток течет вниз по стержню - это означает, что электроны движутся вверх. Это означает, что на каждый свободный электрон внутри стержня действует сила Лоренца, направленная вверх. В то время как сила Лоренца направлена вверх, стержень должен скользить влево по рельсам с постоянной скоростью (рис.б).

Теперь определим скорость движения стержня.

$$i = \frac{\epsilon_{\text{эм}}}{R} = \frac{Bl \sin 90^\circ}{R} = \frac{Bl \nu}{R} \rightarrow \nu = \frac{iR}{Bl} = \frac{(0,5 \text{ А}) \cdot (6 \text{ Ом})}{(2,5 \text{ Тл}) \cdot (1,2 \text{ м})} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Ответ:  $\nu = 1 \text{ м/с}$

§33. ЯВЛЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ. ИНДУКТИВНОСТЬ КАТУШКИ. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. ЯВЛЕНИЕ ВЗАИМНОЙ ИНДУКЦИИ.

Явление самоиндукции:

Давайте соберем цеп на рисунке 33.1. Когда К выключатель подключен, лампа 1 загорается сразу, а лампа 2 загорается немного позже. Ток, проходящий через лампу 1, сразу достигает своего максимального значения. При этом ток, проходящему через лампу 2, потребуется некоторое время, чтобы достичь своего максимального значения. Следовательно, в лампе 2 возникает некая погрешка, которая сопротивляется увеличению силы тока после подключения выключателя. И причиной этого является катушка L. Какое событие происходит при подключении ключа к показано на рис.33.2-а.

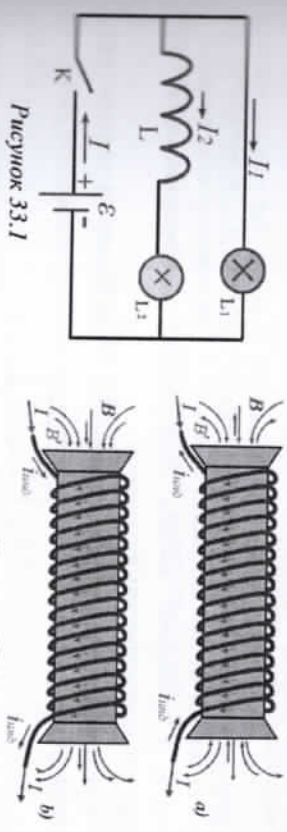


Рисунок 33.1

Рисунок 33.2

При подключении выключателя сила тока начинает увеличиваться. Поэтому магнитный поток, пересекающий поверхность катушки, также начинает увеличиваться. По явлению электромагнитной индукции в катушке возникает индукционный ток. Вторичное поле  $V'$ , генерируемое индукционным током, когда по правилу Ленца  $\Delta\Phi > 0$  направлено в противоположном направлении от основного поля  $V$ . Индукционный ток

также будет направлен против основного тока  $i_{\text{осн}}$ . По этой причине лампа 2 загорается с опозданием.

Когда выключатель отключен, лампа 1 выключается немедленно, а лампа 2 выключается немного позже. Ток, проходящий через лампу 1, сразу достигает своего минимального значения. Ток, проходящий через лампу 2, может занять некоторое время, чтобы достичь своего минимального значения. Значит, лампочка 2 стелкивается с какой-то опорой, опорой, поддерживающей силу тока, препятствующей уменьшению силы тока после отключения выключателя. Причиной этого является катушка  $L$ . Какое событие происходит при подключении, показано на рис.33.2-а. На рис 33.2-б, показано явление происходящий при отключении выключателя.

При отключении ключа сила тока  $I$  начинает уменьшаться. Поэтому магнитный поток, проходящий через поверхность катушки, также начинает уменьшаться. По явлению электромагнитной индукции в катушке возникает индукционный ток. По правилу Ленца, когда  $\Delta\Phi < 0$ , вторичное поле  $B'$ , генерируемое индукционным током, будет направлено в направлении, соответствующем главному полю  $B$ . Также индукционный ток будет направленным с основным током. По этой причине 2-я лампа гаснет с опозданием.

*Сопроизведение катушки, которое оказывает влияние на изменение силы тока, называется индукционной катушкой.*

Чем больше число витков в катушке, тем заметнее запаздание стороны запаздание выключение.

### Индуктивность катушки:

Чем больше ток проходит через катушку, тем больше на ее поверхности возникает ток магнитной индукции, то есть  $\Phi \sim I$ . При переходе от пропорциональности к равенству вводим коэффициент пропорциональности  $L$ , называемый индуктивностью катушечки.

Ток магнитной индукции, образующийся на поверхности катушки при прохождении тока через катушку, равен:

$$\Phi = LI \quad (33.1)$$

Где:  $L = \frac{\Phi}{I} \left[ \frac{Вб}{А} = Гн \right]$  — индуктивность катушки. Индуктивность можно сравнить с массой (инертностью) в механике. Точно так же, как трудно изменить скорость тела с большой массой, также трудно изменить силу тока в катушке с большой индуктивностью.

Джозеф Генри, американский физик, первый секретарь Smithsonian института, родился 1797 декабря 17 года в бедной семье в городке Дэвид, штат Нью-Йорк. С 16 лет начал интересоваться наукой, в 1819 году поступил в Академию Дэвид, а в 1826 году стал профессором Академии Дэвид. Его интерес к магнитному полю Земли привел к тому, что он полностью занялся магнетизмом. Он был первым, кто получил искусственный электромагнит с катушкой и катушкой и изобрел самый мощный электромагнит своего времени. Генри считался одним из величайших ученых своего времени, наряду с Бенджамин Франклином, а также одним из 50 величайших ученых, включенных Линкольном в состав Национальной академии наук США. Единичка измерения индуктивности названа в его честь Генри, и эта мера была названа Нбсг в соответствии с решением XI Генеральной конференции по меркам и Весам в 1960 году. Он умирает в Вашингтоне, округ Колумбия, 13 мая 1878 года.



Джозеф Генри (1797-1868)

Если при прохождении тока  $I$   $A$  через катушку на ее поверхности возникнет магнитный поток  $I B_0$ , то индуктивность такой катушки будет равна  $I Гн (Генри)$ .

$$I Гн = \frac{I B_0}{1 A} \quad (33.2)$$

Индуктивность катушечки-величина, зависящая от геометрических размеров катушки, количества катушек и магнитного проницаемость ферромагнитного сердечника. Выведем формулу индуктивности. По формуле нахождения магнитного потока в одной обмотке катушки возникает индукционный ток  $\Phi_0 = BS \cos \alpha = BS$ . Поскольку общее количество катушек на катушке равно  $N$  единице, на поверхности катушки возникает общий ток индукции  $\Phi = N \Phi_0 = N BS$ . Учитывая, что магнитная индукция в катушке  $B = \mu \mu_0 I \frac{N}{\ell} = \mu \mu_0 I n$ , магнитный поток имеет следующий вид:

$$\Phi = N BS = N \mu \mu_0 I n S = \mu \mu_0 S \frac{N^2}{\ell} \quad (33.3)$$

Установив это равным  $\Phi = LI$  для индуктивности катушки получаем формулу.

$$L = \mu \mu_0 S n N = \mu \mu_0 S \frac{N^2}{\ell} \quad (33.3a)$$

Следовательно, индуктивность катушки определяется по формуле:

$$L = \mu \mu_0 S n N = \mu \mu_0 S \frac{N^2}{\ell} \quad (33.4)$$

С помощью закона электромагнитной индукции можно определить самоиндукционный ЭДС, который возникает в самом контуре при



Эта формула напоминает нам, что в разделе электростатики энергию электрического поля.

$$W = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} V = \frac{ED}{2} V = \frac{D^2}{2\epsilon_0} V$$

Энергия, приходящаяся на единицу объема, называется плотностью энергии.

$$\omega = \frac{W}{V} \quad \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right] \quad (33.13)$$

Плотность энергии магнитного поля будет равна:

$$\omega = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{BH}{2} = \frac{\mu_0 H^2}{2} \quad (33.14)$$

Эта формула напоминает нам, в разделе электростатики плотность энергии

$$\omega = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} = \frac{ED}{2} = \frac{D^2}{2\epsilon_0}$$

#### Явление взаимной индукции:

Возьмем два контура, расположенных близко друг к другу и различающихся по форме и размерам (рис.33.3). Пусть соответственно контурные индуктивности  $L_1$  и  $L_2$ , силы тока в них  $I_1$  и  $I_2$  и магнитные потоки, образующиеся на поверхностях контура, равны  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . Благодаря току  $I_1$  весь электромагнитный поток  $\Phi_1$ , образующийся в контуре 1, пересекает не только поверхность контура 2, но и часть его  $\Phi_{21} (\Phi_{21} < \Phi_1)$ . Кроме того, благодаря току  $I_2$  весь магнитный поток  $\Phi_2$ , генерируемый в контуре 2, пересекает не только поверхность контура 1, но и часть его  $\Phi_{21} (\Phi_{21} < \Phi_2)$ . Если силы тока  $I_1$  и  $I_2$  в контурах сохраняются неизменными, то в этих контурах ничего не происходит. И наоборот, если силы тока в контурах изменятся во времени, то мы проверим, что происходит, основываясь на явлении электромагнитной индукции.

Изменение силы тока в контуре 1 на малый  $dI_1$  создает в нем дополнительное изменение магнитного потока  $d\Phi_1$ . Эта часть измененного магнитного потока  $d\Phi_{21} (d\Phi_{21} < d\Phi_1)$  пересекает контурную грань 2. Запишем это следующим образом:

$$d\Phi_{21} = L_{21} dI_1 \quad (33.15)$$

Это индуцирует ЭДС в контуре 2 по закону электромагнитной индукции.

$$\mathcal{E}_2 = - \frac{d\Phi_{21}}{dt} = - L_{21} \frac{dI_1}{dt} \quad (33.16)$$

Точно так же изменение силы тока в контуре 2 на малый  $dI_2$  создает в нем дополнительное изменение магнитного потока  $d\Phi_2$ . Часть этого измененного

магнитного потока  $d\Phi_{21} (d\Phi_{21} < d\Phi_2)$  пересекает грань контура 1. Запишем это следующим образом:

$$d\Phi_{21} = L_{21} dI_2 \quad (33.17)$$

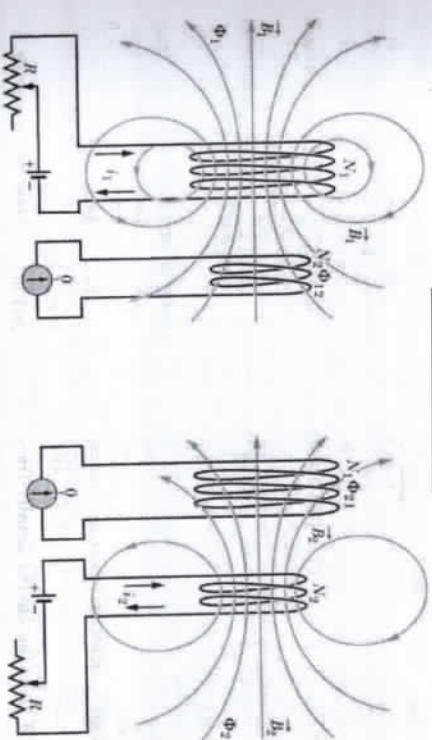


Рисунок 33.3

Это индуцирует ЭДС в контуре 2 по закону электромагнитной индукции.

$$\mathcal{E}_1 = - \frac{d\Phi_{21}}{dt} = - L_{21} \frac{dI_2}{dt} \quad (33.18)$$

Это явление называется явлением взаимной индукции.

Возникновение индукционного ЭДС во втором контуре вследствие изменения силы тока, проходящего через один из контуров, называется явлением взаимной индукции.

В приведенных выше формулах величины  $L_{21}$  и  $L_{21}$  называются взаимной индуктивностью. Экспериментальным и теоретическим путем доказывается взаимное равенство.

$$L_{12} = L_{21} \quad (33.19)$$

Кроме того, величина взаимной индуктивности зависит от геометрической формы контуров, их размеров, количества витков в них, магнитной восприимчивости среды, окружающей контуры, а также от удаленности контуров друг от друга.

Если контуры расположены слишком близко друг к другу, магнитный поток, генерируемый одним из контуров, почти наверняка пересекает и другой, и наоборот. При этом значение взаимной индуктивности лежит в интервале индуктивностей контуров  $L_1$  и  $L_2$ . Если считать, что индуктивность контура 2 больше индуктивности контура 1 ( $L_1 < L_2$ ), то выполняется следующее отношение:



$$L_1 < L_{12} = L_{21} < L_2$$

(33.20)

Единицей измерения взаимной индуктивности является Гн (Гн), как и индуктивности.

Вопросы по теме:

1. Что такое явление самоиндукции? Что такое индуктивность и ее единица измерения? Как определяется индуктивность катушки?
2. По какой формуле определяется магнитный поток, генерируемый на катушке?
3. Запишите выражения энергии магнитного поля и плотности энергии.
4. Запишите выражение самоиндукции ЭДС, которое генерируется на катушке.
5. Что такое взаимная индукция, взаимная индуктивность?

**Решение задач:**

1. Количество обмоток проводов-50. Когда сила тока в этих обмотках возрастает с 0 до 5 А за 0,1 с, в ней индуцируется ЭДС 2 В. Вычислите: а) индуктивность обмоток; б) какой магнитный поток пройдет через каждую обмотку при силе тока 5 А.

**Дано:**  $N=50$   
 $I_0=0$   
 $I=5\text{ А}$   
 $t=0,1\text{ с}$   
 $\mathcal{E}_{\text{инд}}=2\text{ В}$

**Решение:** а) воспользуемся формулой закона электромагнитной индукции.

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -L \frac{I-I_0}{t}$$

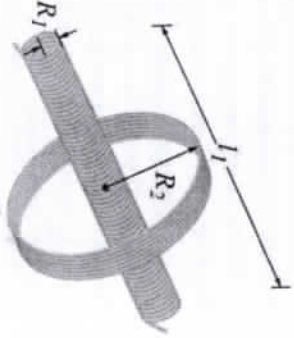
$$L = \frac{|\mathcal{E}_{\text{инд}}| t}{I-I_0} = \frac{2\text{ В} \cdot 0,1\text{ с}}{5\text{ А} - 0\text{ А}} = 0,04\text{ Гн}$$

б) теперь определим магнитный поток в каждой обмотке.

$$\Phi = \frac{LI}{N} = \frac{4 \cdot 10^{-2} \text{ Гн} \cdot 5\text{ А}}{50} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

Ответ: а)  $L=0,04\text{ Гн}$ ; б)  $\Phi=0,004\text{ Вб}$

2. Проводные обмотки с радиусом  $R_2$  обмотки  $N_2$  расположены с концентрически между соленоидом с длиной  $\ell$ , радиусом  $R_1$ , обмотками  $N_1$  на рисунке, имеют тенденцию к сужению. Определите: а) взаимную индуктивность обмоток; б) какой ЭДС образуется в обмотках, замыкающих соленоид, если



$N_1=500, N_2=10, R_1=3,1\text{ см}, \ell_1=7,5\text{ см}$  и сила тока в соленоиде изменяется со скоростью  $200\text{ А/с}$ ?

**Дано:**  $N_1=500$   
 $N_2=10$   
 $dI/dt=100\text{ А/с}$   
 $R_1=3,1\text{ см}$   
 $\ell_1=7,5\text{ см}$

**Решение:** а) магнитное поле внешней обмотки провода отсутствует, а поле внутреннего соленоида определяется по формуле  $B_1 = \mu_0 I \frac{N_1}{\ell_1}$  е. Мы используем эту формулу для расчета магнитного потока, проходящего через внешнюю обмотку. Мы используем магнитный поток для расчета его взаимной индуктивности. Для этого воспользуемся с этой формулой:

$$\Phi_{21} = B_1 \pi R_1^2 = \mu_0 I \frac{N_1}{\ell_1} \pi R_1^2$$

$$L = \frac{N_2 \Phi_{21}}{I} = \left( \frac{N_2}{I} \right) \left( \mu_0 I \frac{N_1}{\ell_1} \right) \pi R_1^2 = \frac{\pi \mu_0 N_1 N_2 R_1^2}{\ell_1}$$

б) с помощью заданных величин определим взаимную индуктивность.

$$L = \frac{\mu_0 N_1 N_2 \pi R_1^2}{\ell_1} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \cdot 500 \cdot 10 \cdot \pi (3,1 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2}{7,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 2,53 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$$

Теперь давайте определим ЭДС, который образуется во внешних обмотках.

$$\mathcal{E}_2 = -L \frac{dI}{dt} = -2,53 \cdot 10^{-5} \text{ Гн} \cdot 200 \frac{\text{А}}{\text{с}} = -5,06 \cdot 10^{-3} \text{ В}$$

Ответ:  $L=2,53 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$ ;  $\mathcal{E}_2=-5,06 \cdot 10^{-3} \text{ В}$

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ГЛАВЕ IV**

Лабораторная работа: № 6.

Определение индуктивного сопротивления катушки с сердечником и без него.

Цель работы: 1. Исследование разности активных и реактивных сопротивлений. 2. Определение коэффициента самоиндукции катушки.

Необходимые инструменты и оборудование: Источник тока  $I_{\text{пр}}=12\text{ В}$ , амперметры для измерения постоянного и переменного тока, вольтметры для измерения постоянного и переменного тока, катушки для

определения коэффициента самоиндукции, железной сердечник, двойной выключатель и соединительные провода.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для этого из определенного участка замкнутой цепи поочередно пропускают то постоянный, то переменный ток (рис.1 - а,б). При подключении цепи к катушке постоянного тока, как показано на рисунке 1-а, через катушку АВ проходит постоянный ток. Тогда активное сопротивление участка АВ (катушки) в цепи, по показаниям амперметров и вольтметров, вычисляется с помощью следующего выражения:

$$R = U/I \quad (3)$$

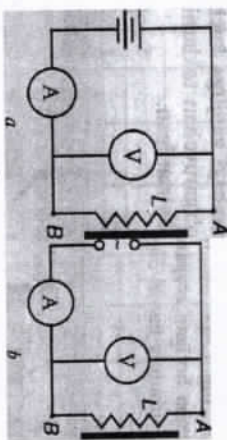


Рисунок 1

Если эту же цепь (рис. 1 - в) подключить к источнику переменного тока, то полное сопротивление детали АВ (катушки) по закону Ома будет рассчитываться следующим образом:

$$Z = U/I_{\text{э}} \quad (4)$$

Поскольку цепь подключена к источнику переменного тока, полное сопротивление катушки определяется по ее активному и реактивному сопротивлениям следующим образом:

$$Z^2 = R^2 + X_L^2 = R^2 + \omega^2 L^2 \quad (5)$$

Строение устройства


Электрическая схема катушечного устройства определения коэффициента самоиндукции собрана по рис.1. В качестве источника тока постоянного тока в приборе применены источник постоянного тока Jhr-12AV, амперметры и вольтметры, измеряющие силу и напряжение постоянного и переменного тока, катушки, в которых определяется коэффициент самоиндукции, железный сердечник, выключатель и соединительный провод. Генератор переменного тока Jhr-12AV может подавать в цепь переменный и переменный ток напряжением от 3 В до 12 В.

Порядок выполнения работ


1. Ознакомившись с инструкцией к лабораторной работе, соберите электрическую схему прибора и проверьте ее у преподавателя. Получить разрешение учителя на запуск устройства.
2. Найти значение R, провода переменный ток через катушку постоянного тока, и значение Z, провода переменный ток.
3. Вычислите средние значения активного и реактивного сопротивлений, повторив опыт для разных значений напряжения.
4. Определите коэффициент самоиндукции катушки по средним значениям результатов эксперимента.
5. Опустив на катушку железный сердечник, повторите опыт, как описано выше.
6. Сравните коэффициенты самоиндукции для состояний без катушки и состояний с катушкой.
7. На основании результатов эксперимента заполните следующую таблицу.

Таблица 1

Определение индуктивного сопротивления индуктивности без катушки.							
№	$R_{\text{д}} [\text{Ом}]$	$U [\text{В}]$	$I [\text{А}]$	$Z [\text{Ом}]$	$x_L [\text{Ом}]$	$\bar{x}_L$	$\Delta x_L$
1							
2							
3							

  
 $x_L = \bar{x}_L \pm \Delta x_L$

Определение индуктивного сопротивления индуктивности с катушкой.							
№	$R_{\text{д}} [\text{Ом}]$	$U [\text{В}]$	$I [\text{А}]$	$Z [\text{Ом}]$	$x_L [\text{Ом}]$	$\bar{x}_L$	$\Delta x_L$
1							
2							
3							


  
 $x_L = \bar{x}_L \pm \Delta x_L$

Контрольные вопросы

1. Что такое явление электромагнитной индукции?
2. Опишите закон электромагнитной индукции.
3. Что такое индуктивность? Запишите формулу индуктивности катушки.
4. Что такое самоиндукция?
5. Что такое взаимная индукция?


### ТЕСТЫ ПО ГЛАВЕ IV

1. Как ведет себя замкнутый контур с током в однородном магнитном поле?
  - A) не двигается.
  - B) движется вперед в сторону более сильной поле.
  - C) вращается вокруг оси, проходящей через центр масс.
  - D) стремится за пределы поля.
  - E) движется вперед в сторону более слабой поле.
2. Какие из пунктов, изображенных ниже, неверны?
  - 1) вокруг проводника тока существует магнитное поле;
  - 2) направление линий магнитного поля определяется направлением генерирующего его тока;
  - 3) проводники с одинаковыми направлениями токов отталкиваются;
  - 4) магнитные полюса Земли не совпадают с географическими полюсами;
  - 5) линии магнитного поля состоят из замкнутого линий, которые окружают ток, генерируемый полем.

A) 1, 2    B) 1 C) 3    D) 4    E) 3, 4.
3. Рамка с током повернулась и встала, как показано на рисунке. Найти направление магнитного поля и магнитные полюса.
 

A) справа налево, справа – север, слева – юг.  
 B) слева направо, слева – север, справа – юг.  
 C) справа налево, справа – юг, слева – север.  
 D) слева направо, справа налево – север, слева направо – юг.  
 E) НПО.
4. Магнитное действие электрического тока наблюдается при прохождении тока через какую среду?
  - A) от электролитов
  - B) от металлов
  - C) из любой среды
  - D) из вакуума
  - E) из полупроводников

5. Тепловое действие электрического тока не наблюдается при прохождении тока через какую среду?
  - A) из вакуума
  - B) из полупроводника
  - C) из газа
  - D) из металла
  - E) из электролита

6. Как направлен вектор магнитной индукции в точке A магнитного поля, сила тока которого одинаковы ( $I_1 = I_2$ ), создаваемого токами в перпендикулярном, параллельном и противоположном направлениях (см. рис.)?
 
  - A) вниз
  - B) вверх
  - C) влево
  - D) вправо
  - E) ноль

7. Укажите выражение индукции магнитного поля, создаваемого бесконечным прямым током  $I$  в среде на расстоянии  $R$  от проводника.
  - A)  $\frac{\mu_0 I d}{2\pi r}$
  - B)  $\frac{\mu_0 I l}{4\pi r}$
  - C)  $\frac{\mu_0 I d}{4\pi r}$
  - D)  $\frac{\mu_0 I^2 l}{\pi r}$
  - E)  $\frac{\mu_0 I}{2\pi r}$

8. Как изменится индукция магнитного поля при увеличении расстояния от прямого проводника с током до наблюдаемой точки в 2 раза?
  - A) уменьшится в 2 раза
  - B) увеличится в 4 раза.
  - C) уменьшится в 4 раза
  - D) уменьшится в 2 раза
  - E) не меняется.

9. Чему равна индукция магнитного поля в центре контура в виде окружности радиусом  $R$ , через которую проходит ток  $I$ ?
  - A)  $4\pi \mu_0 \frac{I}{2R}$
  - B)  $4\pi \mu_0 \frac{I}{R}$
  - C)  $\mu_0 \frac{I}{2R}$
  - D)  $\mu_0 \frac{I}{R}$
  - E)  $2\mu_0 \frac{I}{R}$

10. Какой будет индукция магнитного поля в точке между двумя взаимно перпендикулярными прямыми проводниками, расположенными на расстоянии  $d$  друг от друга и проходящими через каждый из них ток  $I$  в одном направлении?
  - A)  $\mu_0 \frac{2I}{\pi d}$
  - B)  $\mu_0 \frac{I}{\pi d}$
  - C) 0
  - D)  $\mu_0 \frac{I}{2\pi d}$
  - E)  $\mu_0 \frac{4I}{\pi d}$

11. В магнитном поле с магнитной индукцией  $1,5 \text{ Тл}$  располагается рамка длиной  $4 \text{ см}$ , шириной  $2 \text{ см}$ , через которую проходит ток  $0,5 \text{ А}$ . Найти наибольшее значение момента силы, действующей на рамку ( $H \cdot m$ ).
  - A) 6
  - B) 0,75
  - C)  $6 \cdot 10^{-4}$
  - D) 0,03
  - E) 777

12. Через рамку длиной  $4 \text{ см}$  и шириной  $2 \text{ см}$  проходит ток  $10 \text{ А}$ . Каким будет момент силы, действующей на рамку, когда она вводится в магнитное поле, индукция которого составляет  $0,1 \text{ Тл}$ ? ( $H \cdot m$ ).
  - A) 8
  - B) 0,8
  - C) 0,6
  - D) 0,08
  - E) 0.

13. Как изменится сила тока в Амперах, действующая на прямой проводник в однородном магнитном поле, когда индукция магнитного поля и длина проводника уменьшаются в 4 раза?
- А) уменьшится в 4 раза    В) увеличивается в 16 раз.  
 С) уменьшается в 16 раз    Д) увеличивается в 4 раза    Е) не изменяется.
14. В однородном магнитном поле с индукцией  $0,1 \text{ Тл}$  в положении, параллельном линиям индукции, помещается прямой проводник с током  $0,5 \text{ А}$  длиной  $10 \text{ см}$ . Какова сила действия магнитного поля на проводник (Н)?
- А) 0    В) 0,005    С) 0,05    Д) 0,5    Е) 1
15. Проводник длиной  $20 \text{ см}$ , через который проходит ток  $10 \text{ А}$ , находится в магнитном поле с индукцией  $2 \text{ мТл}$ . Какой будет сила в Амперах (мН), если направления тока и вектор магнитной индукции образуют между собой угол  $30^\circ$ ?  $\sin 30^\circ = 0,5$ .
- А) 1    В) 2    С) 2,3    Д) 4,5    Е) 5
16. Как изменится сила тока в Амперах, действующая на проводник, если угол  $30^\circ$  между вектором индукции однородного магнитного поля и прямым проводником с током увеличивается в 2 раза?
- А) увеличивается в 2 раза    В) уменьшается в 2 раза.  
 С) увеличивается в  $\sqrt{2}$  раза    Д) уменьшается в  $\sqrt{3}$  раза  
 Е) увеличивается в  $\sqrt{3}$  раза
17. Магнитное поле с индукцией  $40 \text{ мТл}$  с силой  $60 \text{ мН}$  воздействует на прямой проводник длиной  $10 \text{ см}$ . Сила тока в проводнике  $30 \text{ А}$ . Какой угол образует проводник с вектором индукции магнитного поля?
- А)  $90^\circ$     В)  $60^\circ$     С)  $45^\circ$     Д)  $30^\circ$     Е)  $15^\circ$
18. Как изменится сила Лоренца, действующая на протон магнитным полем, когда скорость протона уменьшится в 4 раза, а индукция магнитного поля увеличится в 2 раза?
- А) увеличивается в 2 раза    В) уменьшается в 4 раза  
 С) увеличивается в 4 раза    Д) уменьшается в 2 раза
19. Когда заряженная частица летит в однородное магнитное поле, на нее действует сила  $F$ , создаваемая магнитным полем. Какова будет сила действия, если кинетическая энергия частицы увеличится в 4 раза?
- А)  $F/4$     В)  $F/2$     С)  $4F$     Д)  $2F$     Е)  $F$

20. Как должна измениться скорость протона, чтобы при увеличении индукции магнитного поля в 4 раза сила, действующая на движущийся в магнитном поле протон, осталась неизменной?
- А) увеличивается в  $\sqrt{2}$  раза    В) увеличивается в 4 раза  
 С) уменьшается в 2 раза    Д) увеличивается в 2 раза  
 Е) уменьшается в 4 раза
21. Направление каких величин определяют с помощью левой руки?
- А) силы Ампера и силы Лоренца    В) только силы Ампера.  
 С) только сила Лоренца.    Д) индукционного тока в прямолинейном проводнике, движущемся в магнитном поле.  
 Е) проводник с током разлпчной формы в магнитное поле
22. Какая из перечисленных ниже сил не выполняет работу?
- А) сила трения    В) сила Ампера    С) Сила натяжения  
 Д) сила Архимеда    Е) сила Лоренца.
23. Замкнутый контур в однородном магнитном поле, движущемся вперед по направлению вектора индукции с ускорением, индуцирует ЭДС?
- А) будет    В) не будет  
 С) становится и линейно убывает    Д) будет и линейно возрастает  
 Е) будет и будет меняться в геометрической прогрессии
24. Равносторонний треугольник со сторонами  $4 \text{ см}$  находится в однородном магнитном поле, составляющем  $2 \text{ Тл}$ . Вектор индукции образует угол  $30^\circ$  с нормально поверхностью треугольника. Найдите магнитный поток, пересекающий поверхность (мВб).
- А)  $0,8\sqrt{3}$     В)  $0,4\sqrt{3}$     С)  $0,4\sqrt{6}$     Д) 1,2
25. Если магнитный поток, проходящий через контур, за  $0,3 \text{ с}$  равномерно уменьшился с  $9 \text{ Вб}$  до  $6 \text{ Вб}$ , то на сколько вольт равна индукция ЭДС в контуре?
- А) 0,01    В) 0,9    С) 4,5    Д) 10    Е) 50
26. Скорость изменения магнитного потока равна  $0,24 \text{ Вб/с}$ . Какое число витков в катушке, если на катушке создается ЭДС  $48 \text{ В}$ ?
- А) 200    В) 250    С) 260    Д) 300    Е) 20
27. В соленоиде магнитный поток изменяется от  $3 \text{ мВб}$  до  $9 \text{ мВб}$  за  $2 \text{ мс}$ . Каково количество обмоток в соленоиде, если ЭДС, образующийся в соленоиде, равен  $60 \text{ В}$ ?

- А) 5      В) 20      С) 180      Д) 200      Е) 300

28. Как изменится энергия магнитного поля, если сила тока в контуре увеличится в 3 раза?

- А) увеличится в 3 раза      В) не изменяется  
С) уменьшается в 9 раз      Д) увеличивается в 9 раз.

29. Через катушку индуктивностью  $2 \text{ мГн}$  проходит ток  $10 \text{ А}$ . Какова энергия магнитного поля катушки (Дж)?

- А) 100      В) 10      С) 0,5      Д) 0,1



#### ЗАДАНИЯ ПО ГЛАВЕ IV

1. Найти индукцию магнитного поля в точке, находящейся на расстоянии  $10 \text{ см}$  в воздухе от бесконечно длинного прямого проводника, через который проходит ток  $15 \text{ А}$ . ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Т} \cdot \text{м/А}$ ).

2. В однородное магнитное поле с индукцией  $0,01 \text{ Тл}$  была введена прямоугольная рамка с площадью  $1 \text{ см}^2$ . Каким будет максимальный момент силы, действующей на него (мкН·м), если по проводам каркаса протекает ток  $1 \text{ А}$ ?

3. Максимальный вращающий момент при воздействии на рамку, находящуюся в магнитном поле, площадью поверхности  $2000 \text{ см}^2$  равен  $0,32 \text{ Н·м}$ , сила тока, проходящего через рамку, равна  $2 \text{ А}$ . Что такое индукция магнитного поля (Тл)?

4. Как изменится сила тока в Амперах, если угол между проводником тока и линиями индукции магнитного поля увеличится с  $30^\circ$  до  $90^\circ$ ?

5. Каков модуль силы (Н), действующей на электрон, индуцированный в однородном магнитном поле с индукцией  $4 \text{ Тл}$ , летящий со скоростью  $10^7 \text{ м/с}$  в направлении, перпендикулярном линиям индукции?

6. Что такое магнитная индукция, если сила Лоренца, действующая на заряд  $0,4 \text{ Кл}$ , движущийся со скоростью  $2 \text{ км/с}$  в вертикальном направлении к линиям магнитной индукции, равна  $8 \text{ Н}$ ?

7. В магнитное поле, индукция которого составляла  $0,2 \text{ Тл}$ , параллельно линиям индукции летели электроны. Какова его скорость (м/с), если сила, действующая на него, равна  $0,32 \cdot 10^{-12} \text{ Н}$ ?  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ .

8. Какова работа, выполняемая магнитным полем (Дж), если траектория электрона, движущегося со скоростью  $2000 \text{ м/с}$  в направлении, перпендикулярном вектору магнитной индукции, состоит из окружности радиусом  $0,5 \text{ м}$ ?

9. Найти радиус кривизны (см) траектории движения электрона, пролетевшего со скоростью  $16 \text{ Мм/с}$  перпендикулярно линиям индукции в однородном магнитном поле с индукцией  $9,1 \text{ мТл}$ .  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ ,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ .

10. Протон в магнитном поле с индукцией  $0,01 \text{ Тл}$  движется по окружности радиусом  $10 \text{ см}$ ? Какова скорость проникновения в поле (км/с)?  $q_p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ ,  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

11. Контур с площадью поверхности  $0,2 \text{ м}^2$  находится в однородном магнитном поле с индукцией  $5 \text{ Тл}$ . Сколько Вебер будет магнитное поле, проходящего через поверхность контура, если плоскость контура расположена параллельно линиям индукции?

12. Найдите магнитную индукцию (Тл), если через плоский контур площадью  $2 \text{ м}^2$  расположенный вертикально к вектору индукции магнитного поля проходит магнитный поток  $10 \text{ Вб}$ ?

13. При вращении проволочного каркаса площадью  $25 \text{ см}^2$  в однородном магнитном поле магнитный поток, пересекающий рамку  $\Phi = 2,5 \cdot 10^{-4} \cos 6t$  (Вб) меняется по закону. Найдите индукция магнитного поля (Тл)?

14. Каков угол между нормалью к поверхности и вектором индукции, если магнитно-индукционный ток, проходящий через поверхность площадью  $1 \text{ м}^2$ , находящуюся в однородном магнитном поле с индукцией  $0,4 \text{ Тл}$ , равен  $0,2 \text{ Вб}$ ?

15. Магнитный поток, пересекающий замкнутый контур, за  $0,4 \text{ с}$  изменился на  $4 \cdot 10^5 \text{ Вб}$ . Определите индукционный ЭДС (В).

16. В катушке с 200 катушками магнитный поток увеличился с  $0,2 \text{ Вб}$  до  $1,1 \text{ Вб}$  при  $0,2 \text{ с}$ . На катушке индуктивности определяют ЭДС (В).

17. Каково число витков в катушке, если в катушке  $\varepsilon = 12 \text{ В}$ , когда скорость изменения магнитного потока составляет  $60 \text{ мВб/с}$ ?

18. Какова должна быть скорость изменения магнитного потока (мВб/с) для возбуждения (генерации) индукционного тока  $120 \text{ В}$  в соленоиде на 200 витков?

19. Магнитный поток через кольцеобразный проводника за  $3 \text{ с}$  изменился на  $0,144 \text{ Вб}$ . Сколько Ампер индукционного тока, если сопротивление проводника равно  $0,24 \text{ Ом}$ ?

20. На сколько Ампер составит сила тока в обмотке в интервале  $2-4 \text{ с}$ , если магнитный поток, пересекающий интервал с сопротивлением  $3 \text{ Ом}$ , изменится как показано на рисунке?

21. Рамка с числом витков 100 и площадью  $100 \text{ см}^2$  вращается в однородном магнитном поле с индукцией  $0,01 \text{ Тл}$ . Через сколько секунд он вращается, если наибольшее значение ЭДС составляет  $2 \text{ В}$ ?
22. Рама площадью  $200 \text{ см}^2$  вращается в однородном магнитном поле с индукцией  $0,4 \text{ Тл}$  с угловой скоростью  $50 \text{ рад/с}$ . Сколько вольт составляет амплитудное значение ЭДС образующийся в каркасе?
23. Прямой проводник длиной  $0,1 \text{ м}$  движется в однородном магнитном поле с индукцией  $1 \text{ Тл}$  со скоростью  $10 \text{ м/с}$ . Вектор магнитной индукции, вектор скорости и проводник перпендикулярны. Найти индукционную ЭДС, при которой возникает перемещение проводника (В).
24. В результате перемещения проводника длиной  $20 \text{ см}$  в однородном магнитном поле в направлении, перпендикулярном линиям индукции, со скоростью  $5 \text{ м/с}$  образовалась индукционная ЭДС  $0,2 \text{ В}$ . Найдите индукция магнитного поля (Тл)?
25. С какой скоростью (м/с) перемещается проводник с длиной  $0,5 \text{ м}$  под углом  $30^\circ$  к линиям магнитной индукцией  $0,2 \text{ Тл}$ , в котором образуется ЭДС индукции  $0,8 \text{ В}$ ?
26. На сколько м/с должна приходиться скорость полного проводника, чтобы в медном проводнике, движущемся в вертикальном направлении к линиям индукции в магнитном поле с индукцией  $1 \text{ т}$ , образовалась индукционный ток  $1 \text{ А}$ ? Поперечное сечение проводника  $0,017 \text{ мм}^2$ , удельное сопротивление меди  $1,7 \cdot 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .
27. При прохождении тока в  $2 \text{ А}$  через соленоид создаваемая энергия магнитного поля становилась равной  $3 \text{ Дж}$ . Какова индуктивность соленоида (Гн)?
28. Максимальная энергия электрического поля в контуре колебаний  $80 \text{ мДж}$ , амплитудное значение силы тока в катушке  $10 \text{ А}$ . Какова индуктивность катушки (мГн)?
29. Сколько Вебера составляет создаваемый ток магнитного поля, когда сила тока в соленоиде равна  $10 \text{ А}$ , а энергия магнитного поля равна  $2,5 \text{ Дж}$ ?
30. Сколько Ампер силы тока, если магнитный поток в соленоиде равен  $2 \text{ Вб}$ , а энергия поля равна  $5 \text{ Дж}$ ?
31. Самолет летит горизонтально со скоростью  $900 \text{ км/ч}$ . Определить разность потенциалов между концами его крыла, если магнитное поле Земли является вертикальным составляющим магнитной индукции, а длина крыльев самолета составляет  $12 \text{ м}$ .
32. Сила тока в катушке с индуктивностью  $0,15 \text{ Гн}$  и очень малым сопротивлением  $r$  равна  $4 \text{ А}$ . Параллельно катушке подключается резистор с сопротивлением  $R \gg r$ . Какое количество теплоты выделяется в катушке и резисторе при резком отключении источника тока?
33. Когда ток проходит через спиральный провод, его обмотки притягиваются друг к другу, и спираль сжимается вдоль своей оси. Как это можно объяснить?
34. В направлении, перпендикулярном магнитному полю с индукцией  $2 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$ , помещается проводник с током длиной  $0,5 \text{ м}$ . Найти силу тока, протекающего через него, если магнитное поле действует на проводник с силой  $0,15 \text{ Н}$ .
35. На проводник прямого тока длиной  $0,4 \text{ м}$ , помещенный в однородное магнитное поле, действует сила  $0,09 \text{ Н}$ . Определить угол между током и вектором индукции, если сила тока в проводнике  $10 \text{ А}$ , индукция поля  $76 \text{ мТл}$ .
36. На двух параллельных шинах, расположенных горизонтально на расстоянии  $10 \text{ см}$  друг от друга, лежит проводник массой  $100 \text{ г}$ . При подключении шины к розетке через проводник проходит ток  $10 \text{ А}$ . Когда вектор индукции направлен перпендикулярно плоскости шины, проводник начинает двигаться равномерно. Определить индукцию магнитного поля, если коэффициент трения проводника о шину равен  $0,2$ .
37. Заряженная частица движется по окружности в магнитном поле со скоростью  $10^6 \text{ м/с}$ . Индукция магнитного поля  $0,3 \text{ Тл}$ , радиус вращения  $4 \text{ см}$ . Каким должен быть заряд частицы, чтобы ее кинетическая энергия составляла  $12 \text{ кэВ}$ ?
38. Перпендикулярно линиям магнитной индукции электрон влетел в однородное магнитное поле. Скорость электрона  $4 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ , магнитная индукция  $1 \text{ мТл}$ . Найти центростремительное ускорение электрона.
39. Когда магнитный поток, пересекающий контур проводника, изменился на равномерный  $0,8 \text{ Вб}$ , индукционная ЭДС стала равной  $1,6 \text{ В}$ . Найдите время изменения магнитного потока. Какова сила индукционного тока, если сопротивление проводника равно  $0,32 \text{ Ом}$ ?
40. Определить индукционный ЭДС, возникающий при быстром движении  $2 \text{ м/с}$  проводника длиной  $0,5 \text{ м}$  перпендикулярно силовым линиям в однородном поле с индукцией  $0,1 \text{ Тл}$ .
41. В катушке на 100 катушек магнитный поток плавно уменьшался с  $5 \text{ мВб}$  до  $2,5 \text{ мВб}$  в течение  $5 \text{ мс}$ . Найти индукционный ЭДС.

42. Горизонтальный стержень длиной  $l$  м вращается вокруг оси, проходящей через один из его концов. Силовые линии магнитного поля, индукция которых  $5 \cdot 10^6$  Тл, параллельны оси вращения. Во сколько раз в секунду вращается стержень, разность потенциалов на его концах равна  $1$  мВ?
43. катушка длиной  $20$  см и диаметром  $3$  см имеет  $400$  витков, через которые проходит ток  $2$  А. Определить индуктивность катушки и силу тока, проходящего через катушку.
44. Магнитная индукция в стальной цилиндре  $0,75$  Тл. Какова магнитная проницаемость стали, если индукция магнитного поля, создаваемого токами, равна  $1,88$  мТл?
45. Индуктивность  $4 \cdot 10^{-7}$  Гн соленоида длиной  $60$  см и поперечной сечению равна  $4$  см<sup>2</sup>. Какой должна быть сила тока в соленоиде, чтобы плотность энергии магнитного поля была внутри соленоида  $2$  мДж/м<sup>3</sup>?

## У ГЛАВА. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Колебательное движение является наиболее распространенным движением в природе. Мы много раз наблюдали, как шатаются ветки деревьев или трава на полях.

Струны музыкальных инструментов, как дутор, рубоб, движения полесенных часов, движение поршней в цилиндре двигателя внутреннего сгорания считается колебательное движением.

При работающем двигателе корпуса машины и станков совершают колебательное движение с вибрацией. При ринговоре по телефону, при звуках с ринго тонкая мембрана в них совершает колебательное движение. Также, когда мы говорим вибрация нашей звуковой проволоки передается молекулам воздуха, и возникает звук.

Между молекулами любого вещества в природе существует взаимодействие. Если причина выводит молекулу упругой среды или систему молекул из равновесного состояния и заставляет их совершать колебательное движение, то это движение передается соседним молекулам, которые также начинают участвовать в колебательном движении.

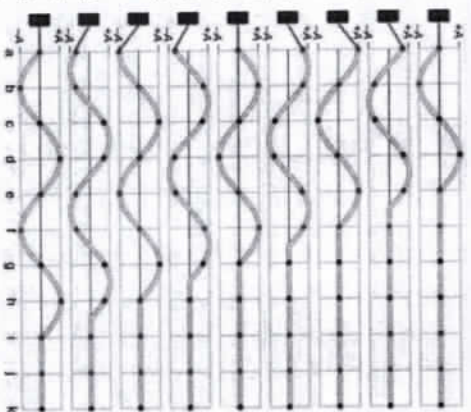
Распространение колебаний во времени и пространстве образует волновую движение. Отдельно стоит отметить, что при этом молекулы среды не двигаются, а колеблются вокруг своего равновесия. Типы волн разнообразны, а волны, распространяющиеся в упругой среде, являются механическими волнами.



### § 34. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О МЕХАНИЧЕСКОЙ КОЛЕБАНИЕ.

Приведенные выше примеры относятся к механическому колебательному движению. В природе, кроме механических колебательных движений, существуют также процессы, не относящиеся к механике которые периодически повторяются.

Процессы, которые повторяются в течение равного или почти равного периода времени, называются периодическими процессами. Например, ежедневные восходы и заходы солнца, смена времен года, солнечные и лунные затмения и т. д.



Помимо этих изменений, примерами периодических колебательных движений являются периодические изменения заряда, силы тока и напряжения в цепи переменного тока, периодическое повторение изменений температуры и давления в цилиндре двигателя внутреннего сгорания и т. д.

Кроме того, механические колебания также относятся к циклическим процессам, и их можно рассматривать в общем случае как один механический тип периодических процессов.

Если изменение координаты движущегося тела во времени подчиняется закону синуса или косинуса, такое колебание называется гармоническим колебанием. Изучаем свободные колебания гармонических колебаний. Общее уравнение движения колеблющихся тел по закону косинуса или синуса имеет следующий вид:

$$x = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0) \quad \text{или} \quad x = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) \quad (34.1)$$

Убедиться в том, что гармонические колебания подчиняются закону синуса или косинуса, можно, провести следующий эксперимент: на более длинной нити подвешиваем сосуд, наполненную песком и с отверстием в основании. Песок начинает вытекать из отверстия, когда мы вытаскиваем сосуд из положения равновесия и отпускаем его. Теперь начинаем потихоньку тянуть наполненную бумагу в поперечном направлении к плоскости колебания. След песка, разлитый на бумаге, напоминает нам график синуса или косинуса (рис. 34.1). Если колебания возникают под действием внутренней силы после выхода тела из положения равновесия, такое колебание называется свободным колебанием. Случай, изображенный на рисунке 30.1, также является свободным колебанием. Кроме того, существуют также проявления гармонических колебаний, известные как вынужденные и затухающие колебания.



Рисунок 34.1

Если колебания возникают под действием внешней вынуждающей силы, такую колебанию называют вынужденной колебанием. Если колебания возникают под действием внутренней силы и воздействия после выхода тела из состояния равновесия, когда движение возникает под действием сил сопротивления, такая колебания называется затухающей колебанием. В этой главе мы подробно рассмотрим только свободные колебания и характеризующие их величины.

Время, затрачиваемое колебательным движением на одно полное колебание движущегося тела, называется периодом колебаний и обозначается буквами  $T$ . Единица измерения периода колебаний  $[T]=s$ .

Число колебаний движущегося тела в течение одной секунды называется частотой колебаний и определяется  $\nu$ . Единица измерения частоты колебаний  $[\nu]=s^{-1}=Гц$ .

Число колебаний движущегося тела за  $2\pi$  секунды называется циклической (круговой) частотой и обозначается  $\omega$ . Единица измерения циклической частоты  $[\omega]=s^{-1}=Гц$ .

Расстояние наибольшего смещения от равновесного положения колеблющегося тела называется амплитудой колебания и обозначается  $x_m$  или  $A$ . Единица измерения амплитуды колебаний  $[x_m]=m$ .

Соотношение между периодом колебаний, частотой колебаний и циклической величиной частоты будет следующим:

$$\omega = 2\pi \nu = \frac{2\pi}{T}, \quad \nu = \frac{1}{T} \quad (34.2)$$

Если тело колеблется  $N$  раз за время  $t$ , период колебаний, частота колебаний и циклическая частота будут следующими:

$$T = \frac{t}{N}, \quad \nu = \frac{N}{t}, \quad \omega = 2\pi \cdot \frac{N}{t} \quad (34.3)$$

Мы хорошо знаем, что скорость и ускорение являются производными от координаты по времени. Таким образом, уравнения скорости и ускорения гармонически колеблющегося тела также подчиняются гармоническому закону.

Выведенное из состояния равновесия (уравнение движения которого подчиняется закону косинуса) уравнение изменения координат, скорости и ускорения свободно колеблющегося тела во времени будет иметь вид:

$$x = x_m \cos \omega t \quad [m], \quad v = -\omega x_m \sin \omega t \quad [m/s], \quad a = -\omega^2 x_m \cos \omega t \quad [m/s^2] \quad (34.4)$$

Графики зависимости координат, скорости и ускорения гармонически колеблющегося тела от времени будут такими же, как на рисунке 34.2.

Амплитудные значения координат, скорости и ускорения гармонически колеблющегося тела будут:

$$x_m = A, \quad v_m = \omega A, \quad a_m = \omega^2 A \quad (34.5)$$

Как известно, любое движущееся тело будет обладать механической энергией. Следовательно, колебательное движение также будет иметь свою энергию.



Формула кинетического энергии  $E_k = \frac{m \dot{x}^2}{2}$  если, поставить формулу написана выше  $\dot{x} = -\omega x_m \sin \omega t$  то при колебательном движении кинетическая энергия изменяется по закону.

$E_k = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2 \omega t = E_{\text{общ}} \sin^2 \omega t$

А потенциальная энергия изменяется по следующему закону.

$$E_{\text{п}} = \frac{1}{2} k x^2 = \frac{1}{2} k (x_m \cos \omega t)^2 = \frac{k x_m^2}{2} \cos^2 \omega t = E_{\text{общ}} \cos^2 \omega t$$

Здесь  $E_{\text{общ}} = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$  общая механическая энергия.

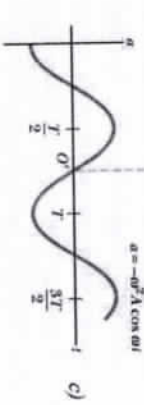
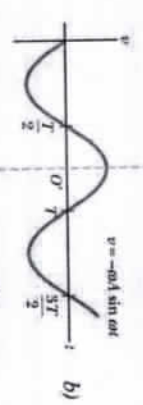
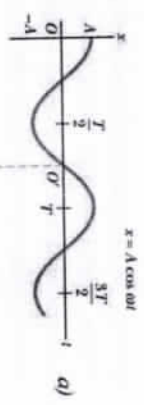


Рисунок 34.2

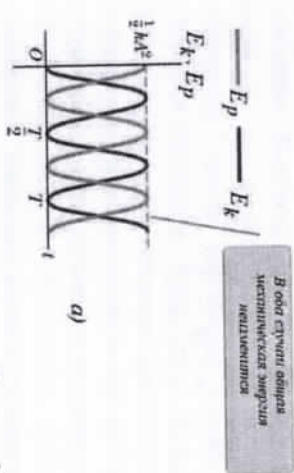
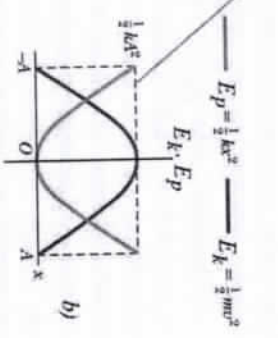


Рисунок 34.3



Следовательно, кинетическая энергия, потенциальная энергия и полная механическая энергия гармонического колебательного движения будут следующими. (34.3-а,г,з,и):

$$E_k = E_{\text{общ}} \sin^2 \omega t, \quad E_p = E_{\text{общ}} \cos^2 \omega t, \quad E_{\text{общ}} = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \quad (34.6)$$

Если выразить подстановки в приведенной выше формуле, то образуются формулы зависимости кинетической и потенциальной энергий от расстояния (координаты) (рис.34.3-б):

$$\cos \omega t = \frac{x}{x_m}, \quad \sin \omega t = \sqrt{1 - \cos^2 \omega t} = \sqrt{1 - \frac{x^2}{A^2}} = \frac{\sqrt{A^2 - x^2}}{A}$$

$$E_k = \frac{1}{2} m \omega^2 \sqrt{A^2 - x^2}^2, \quad E_{\text{п}} = \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 \quad (34.7)$$

Кинетическая и потенциальная энергии гармонически колеблющихся тел циклически преобразуются друг в друга. Подробнее об этом озакомимся в пружинных и математических маятниках.

**Вопросы по теме:**

1. Что называется колебательным движением? Что такое периодический процесс?
2. Дать определение понятиям вынужденного и затухающего колебания.
3. Дать определение понятиям период колебаний, частота и циклическая частота. Запишите выражения, которые их связывают.
4. Что такое гармоническое колебательное движение?
5. Что такое амплитуда колебаний? Что такое скорость и амплитуда ускорения?
6. Напишите общую формулу энергии в колебательном движении.
7. Напишите уравнение зависимости кинетической и потенциальной энергии от времени и нарисуйте график.
8. Напишите уравнение зависимости кинетической и потенциальной энергии от координаты и нарисуйте график.

**Решите задачи:**

1. Если амплитуда колебаний материальной точки равна 4 см, то каким будет ее путь (см), пройденный за одно полное колебание?

А) 0 В) 4 С) 8 Д) 16

Дано:

$x_0 = 4$  см

S = ?

Решение:

Периодически колеблющаяся тело дважды проходит через состояние равновесия, когда оно полностью колеблется один раз. Это означает, что он проходит расстояния  $S = 4x_0$  за колебание.  
 $S = 4x_0 = 4 \cdot 4$  см = 16 см.

Ответ: Д) 16.

2. На каком части периода T гармонически колеблющаяся тело пройдет путь от положения равновесия к крайнему состоянию?

Дано:

$x = x_0$

Решение:

$t = 0$  при гармонически колеблющегося тела, находящегося в равновесии, уравнение движения:

$x = x_0 \sin \omega t.$

Значит,  $x_0 = x_0 \sin \omega t,$  →  $\sin \omega t = 1$

Нам известно, что

$\sin \frac{\pi}{2} = 1. \quad \omega t = \frac{\pi}{2}$

Формула связи циклической частоты с периодом  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  мы поместим в приведенную выше формулу.

$$\frac{2\pi}{T} t = \frac{\pi}{2}, \quad t = \frac{\pi T}{2} = \frac{T}{4}$$

Ответ:  $T/4$ .

3. Маятник колеблется 120 раз за 1 минуту. Определить частоту колебаний.

Дано:

$$t = 1 \text{ мин} = 60 \text{ с}$$

$$N = 120$$

$$v = ?$$

Решение:

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

Используем формулу:

$$v = \frac{N}{t} = \frac{120}{60} = 2 \text{ Гц}$$

Ответ: 2 Гц.

### § 35. ПРУЖИННЫЙ МАЯТНИК

Пусть тело массой  $m$ , закрепленное на пружине с жесткостью  $k$ , находится на горизонтальной гладкой поверхности. Свободное колебательное движение возникает под действием силы упругости, когда это тело растягивается и отщупсается на расстояние  $x_m = A$ . Далее мы кратко назовем колебание шара, подвешенной на пружине, пружинным маятником.

Свободное колебание пружинного маятника-гармонический процесс, при котором изменение координаты во времени подчиняется закону синуса или косинуса. На вертикальную подвесную пружину на рис.35.1 подвешивается груз массой  $m$ . Пусть карандаш крепится с одной стороны от этой нагрузки. При перемещении бумаги в горизонтальном направлении, как на рисунке, при колебаниях нагрузки образуются графики зависимости синуса или косинуса от времени, то есть график одной из функций  $y = \sin \omega t$  и  $y = \cos \omega t$ .

На рисунке 35.2 показаны различные ситуации колебательного движения пружинного маятника в одном колебательном процессе и распределение энергии в соответствии с этими ситуациями.

Как видно из рисунка выше, в процессе колебания потенциальная и кинетическая энергии периодически превращаются друг в друга. В крайних случаях, поскольку растяжение является максимальным, потенциальная энергия также максимальна, а кинетическая энергия равна нулю, поскольку скорость равна нулю. При переходе из состояния равновесия происходит обратное, то есть потенциальная энергия равна нулю, а кинетическая энергия максимальна (рис.35.2-б). 35.2-с, а на рисунке представлены значения

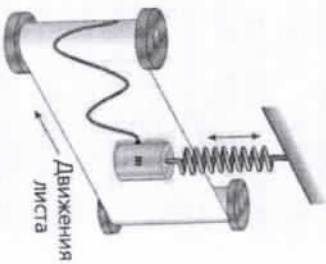


Рисунок 35.1

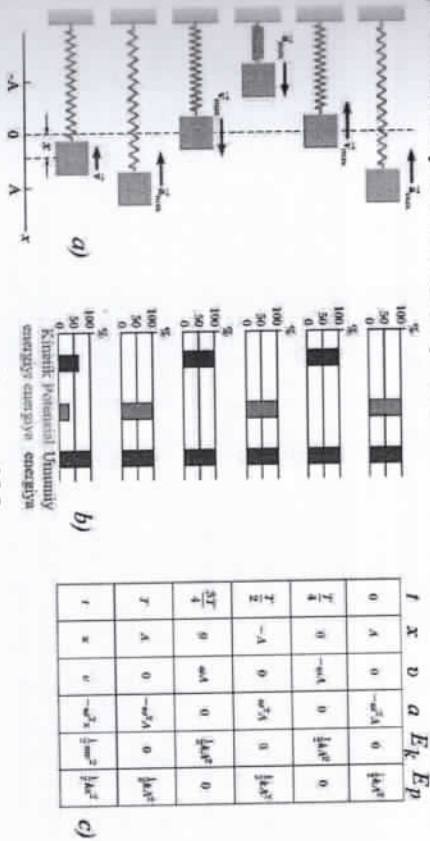


Рисунок 35.2

Сила упругости сначала придает шару ускорение. В результате возникает сила инерции. Сила инерции и сила упругости являются количественно равными и направлены в противоположные стороны (напомним, что сила инерции считается силой, которой нет в природе, и эта сила вводится условно, чтобы легче было объяснить явления и процессы).

$$F_m = -F_{\text{упр}}, \rightarrow m a_x = -kx, \rightarrow a_x = -\frac{k}{m}x, \rightarrow \ddot{x} = -\frac{k}{m}x$$

Следовательно, получается, что в пружинном маятнике зависимость ускорения от координаты будет следующей (рис. 35.3):

$$a_x = -\frac{k}{m}x \quad \text{или} \quad \ddot{x} = -\frac{k}{m}x \quad (35.1)$$

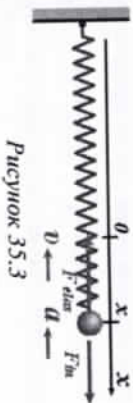


Рисунок 35.3

Как видно из приведенной выше формулы, производная второго порядка от координаты снова оказывается зависимой от координаты. Из математики известно, что производная второго порядка функций  $y = \sin x$  и  $y = \cos x$  опять оказывается зависимой от этих функций. Следовательно, даже в пружинном маятнике уравнение зависимости координаты от времени подчиняется закону синуса или косинуса. Попробуем доказать свою точку зрения следующим образом: поскольку тело, закрепленное на пружине, сначала выводится из равновесного положения, а затем наблюдается свободное колебание, то предположим, что уравнение движения подчиняется закону косинуса, т. е.

$x = x_m \cos \omega t$ . Из этого мы находим ускорение, производное по времени два раза подряд.

$$\dot{x} = -\omega x_m \sin \omega t, \rightarrow \ddot{x} = -\omega^2 x_m \cos \omega t = -\omega^2 x$$

Значит,

$$\omega^2 = \frac{k}{m}, \rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

оказывается. А уравнение движения будет выглядеть так.

$$x = x_m \cos \omega t = x_m \cos \left( \sqrt{\frac{k}{m}} t \right)$$

В пружинном маятнике циклическая частота, частота колебаний, период колебаний будут следующими:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (35.2)$$

В пружинном маятнике уравнения зависимости координат, скорости и ускорения от времени будут выглядеть следующими образом:

$$x = x_m \cos \left( \sqrt{\frac{k}{m}} t \right), \quad \dot{x} = -x_m \sqrt{\frac{k}{m}} \sin \left( \sqrt{\frac{k}{m}} t \right), \quad \ddot{x} = -x_m \frac{k}{m} \cos \left( \sqrt{\frac{k}{m}} t \right) \quad (35.3)$$

В пружинном маятнике амплитудные значения координат, скорости и ускорения будут следующими:

$$x_m = A, \quad \dot{x}_m = A \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \ddot{x}_m = A \frac{k}{m} \quad (35.4)$$

Давайте вычислим потенциальную, кинетическую и полную энергии в пружинном маятнике. Потенциальная энергия имеет следующий вид:

$$W_p = \frac{kx^2}{2} = \frac{k}{2} (x_m \cos \omega t)^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \cos^2 \omega t = W_{pm} \cos^2 \omega t$$

Аналогично находят кинетическую энергию.

$$W_k = \frac{m\dot{x}^2}{2} = \frac{m}{2} (-x_m \omega \sin \omega t)^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2 \omega t = W_{km} \sin^2 \omega t$$

А полная энергия равна сумме кинетической и потенциальной энергий.

$$W_{um} = W_p + W_k = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \cos^2 \omega t + \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$$

Следовательно, в пружинном маятнике потенциальная, кинетическая и полная энергии будут:

$$\begin{aligned} W_p &= \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \cos^2 \omega t = W_{pm} \cos^2 \omega t \\ W_k &= \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2 \omega t = W_{km} \sin^2 \omega t \\ W_{um} &= \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \end{aligned} \quad (35.5)$$

Графики изменения энергий во времени изображены на рисунке 34.3 в предыдущей теме и на рисунке 36.2 в следующей теме, что используема для всех типов гармонически свободно колеблющихся тел.

**Вопросы по теме:**

1. Почему движение груза, подвешенного на пружине, называется гармоническим колебанием?
2. Запишите формулы периода, частоты и циклической частоты колебаний пружинного маятника.
3. Запишите уравнения зависимости координат, скорости и ускорения от времени для пружинного маятника. Запишите амплитуды скорости и ускорения.
4. Выпишите формулы зависимости скорости и ускорения пружинного маятника от координат и постройте график.
5. Запишите кинетическую, потенциальную и полную энергии для пружинного маятника.
6. Выпишите формулы и постройте график зависимости кинетической и потенциальной энергии пружинного маятника от координаты.

**Решение задач:**

1. С какой скоростью проходит через состояние равновесия нагрузка массой  $m$  которое колебается в пружине с амплитудой  $A$ , с жесткостью  $k$  ?

- A)  $A \sqrt{\frac{k}{m}}$     B)  $A \sqrt{\frac{k}{m}}$     C)  $\sqrt{A \frac{k}{m}}$     D)  $A \sqrt{mk}$

Дано:  $k$

Решение: Для энергии гармонической колеблющейся пружины уместно следующее выражение.

$x_0 = A$	$W_{pmax} = W_{kmax}$
$m$	$W_{kmax} = \frac{m v_{max}^2}{2}$
$W_{pmax} = ?$	$W_{pmax} = \frac{kx_0^2}{2}$

Исходя из этих выражений, получим следующее выражение

$$\frac{m v_{max}^2}{2} = \frac{kx_0^2}{2}$$

Из этого выражения находим скорость

$$v_{max} = \sqrt{\frac{kx_0^2}{m}} = x_0 \sqrt{\frac{k}{m}} = A \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Ответ: B)  $A \sqrt{\frac{k}{m}}$

2. Каков период колебаний груза массой  $m$ , подвешенного на двух одинаковых пружинах, соединенных последовательно, с жесткостью  $k$  ?

- A)  $2\pi\sqrt{\frac{m}{2k}}$       B)  $\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$       C)  $2\pi\sqrt{\frac{2m}{k}}$       D)  $4\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

Дано:  
 $k_1 = k_2 = k$   
 $m = m$   
 $T = ?$

Решение:

При последовательном соединении пружин общая жесткость находится:

$$\frac{1}{k_{\text{итм}}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} = \frac{1}{k} + \frac{1}{k} = \frac{2}{k}, \quad k_{\text{итм}} = \frac{k}{2}$$

Воспользуемся формулой нахождения периода колебаний пружинного маятника:

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

Ответ: C)  $2\pi\sqrt{\frac{2m}{k}}$

3. На пружину подвешивается груз массой 4 кг и гармонически колебается с периодом T. Сколько килограммов груза нужно снять, чтобы период сократился до T/2?

Дано:

$m_1 = 4 \text{ кг}$

$T_1 = T$

$T_2 = \frac{T}{2}$

$\Delta m = m_1 - m_2$

Решение:

Согласно приведенной выше формуле:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{2\pi\sqrt{\frac{m_1}{k}}}{2\pi\sqrt{\frac{m_2}{k}}} = \frac{\sqrt{m_1}}{\sqrt{m_2}} = \frac{T}{\frac{T}{2}} = 2$$

Из этого получаем следующее и возводим две части уравнения в квадрат:

$\sqrt{\frac{m_1}{m_2}} = 2,$

$\frac{m_1}{m_2} = 4,$

$m_1 = 4m_2,$

$\Delta m = m_1 - m_2 = 4 - 1 = 3 \text{ кг}$

Ответ: C)



§ 36. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК

Математическим маятником называют тело малых размеров, подвешенное на тонкой нерастяжимой нити, масса которой пренебрежимо мала по сравнению с массой тела.

В математическом маятнике свободное колебательное движение возникает под действием силы тяжести, когда шар, подвешенный на нити, отступает с отклонением на меньший угол, чем положение равновесия.

В математическом маятнике, как и в пружинном маятнике, потенциальная и кинетическая энергии циклически вращаются друг вокруг друга. Усилия силы тяжести на траектории, составляющие  $P_{\text{инт}}$ , сначала дает шару ускорение. В результате возникает сила инерции. Сила инерции и

составляющая сила равны по величине и направлены в противоположные стороны (рис.36.1).

$$F_{\text{ин}} = -P_{\text{инт}} = -P \sin \alpha, \rightarrow ma = -mg \sin \alpha, \rightarrow a = -g \sin \alpha = -g \frac{x}{\ell}$$

когда угол  $\alpha$  слишком мал,  $a \approx a_x$  будет.

$$a_x = -\frac{g}{\ell} x, \rightarrow \ddot{x} = -\frac{g}{\ell} x$$

Следовательно, в математическом маятнике зависимость ускорения от координаты имеет вид:

$$a_x = -\frac{g}{\ell} x \quad \text{или} \quad \ddot{x} = -\frac{g}{\ell} x \quad (36.1)$$

Как видно из приведенной выше формулы, производная второго порядка от координаты снова оказывается зависимой от координаты. Из математики известно, что производная второго порядка от функции  $y = \sin x$  или  $y = \cos x$  снова оказывается зависимой от этих функций.

Следовательно, даже в математическом маятнике уравнение зависимости координаты от времени подчиняется закону синуса или косинуса.

Попробуем доказать свою точку зрения следующим образом: предположим, что уравнение движения подчиняется закону косинуса, так как висций на нитке шарик сначала выводится из равновесного состояния, а затем наблюдается свободное колебание.

$x = x_m \cos \omega t$  производя два раза

производное по времени, находим ускорение.

$$\dot{x} = -\omega x_m \sin \omega t, \rightarrow \ddot{x} = -\omega^2 x_m \cos \omega t = -\omega^2 x$$

Значит,

$$\omega^2 = \frac{g}{\ell}, \rightarrow \omega = \sqrt{\frac{g}{\ell}}$$

получается. А уравнение движения будет выглядеть так.

$$x = x_m \cos \omega t = x_m \cos \left( \sqrt{\frac{g}{\ell}} t \right)$$

В математическом маятнике циклическая частота, частота колебаний, период колебаний будут следующими:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{\ell}}, \quad \nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\ell}}, \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}} \quad (36.2)$$

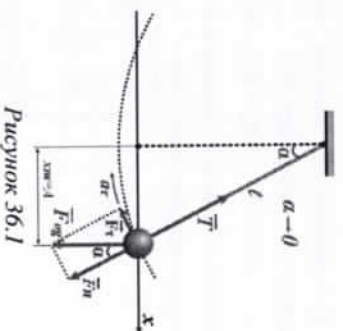


Рисунок 36.1

В математическом маятнике уравнения зависимости координат, скорости и ускорения от времени будут выглядеть следующим образом:

$$x = x_m \cos \left( \sqrt{\frac{g}{\ell}} t \right), \quad v = -x_m \sqrt{\frac{g}{\ell}} \sin \left( \sqrt{\frac{g}{\ell}} t \right), \quad a = -x_m \frac{g}{\ell} \cos \left( \sqrt{\frac{g}{\ell}} t \right) \quad (36.3)$$

В математическом маятнике амплитудные значения координат, скорости и ускорения будут следующими:

$$x_m = A, \quad v_m = A \sqrt{\frac{g}{\ell}}, \quad a_m = A \frac{g}{\ell} \quad (36.4)$$

Давайте посчитаем, какими будут потенциальная, кинетическая и полная энергии в математическом маятнике. Кинетическая энергия имеет вид:

$$W_k = \frac{m v^2}{2} = \frac{m}{2} (-x_m \omega \sin \omega t)^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2 \omega t = W_{km} \sin^2 \omega t$$

Общая энергия определяется в этой последовательности.

$$W_{\text{общ}} = mg \Delta h = mg \ell (1 - \cos \alpha) = m \omega^2 \ell^2 (1 - \cos \alpha) = m \omega^2 \frac{x_m^2}{\sin^2 \alpha} (1 - \cos \alpha) = m \omega^2 \frac{A^2}{(1 - \cos \alpha)(1 + \cos \alpha)} (1 - \cos \alpha) \approx \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$$

Потенциальная энергия находится путем вычитания кинетической энергии из полной энергии.

$$W_{\text{п}} = W_{\text{общ}} - W_k = W_{\text{общ}} \sin^2 \omega t = W_{\text{общ}} (1 - \sin^2 \omega t) = W_{\text{общ}} \cos^2 \omega t$$

Таким образом, в математическом маятнике потенциальная, кинетическая и полная энергия имеет вид:

$$\begin{aligned} W_{\text{п}} &= \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \cos^2 \omega t = W_{\text{пм}} \cos^2 \omega t \\ W_k &= \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2 \omega t = W_{\text{км}} \sin^2 \omega t \\ W_{\text{общ}} &= \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \end{aligned} \quad (36.5)$$

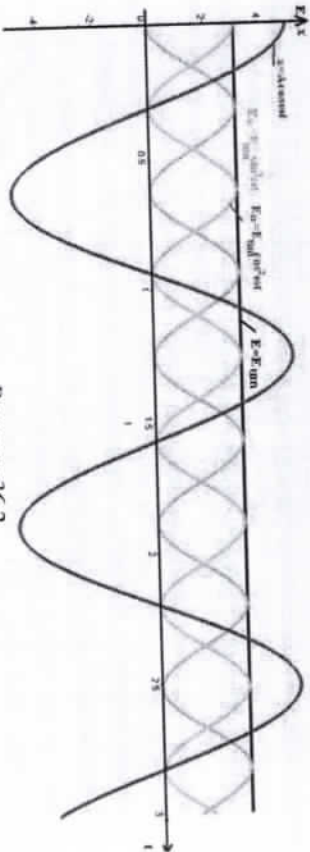


Рисунок 36.2

Во всех гармонически колеблющихся маятниках кинетическая и потенциальная энергии циклически превращаются друг в друга, но полная механическая энергия не изменяется со временем. Потенциальная и кинетическая энергии частота колебаний в два раза больше частоты координат (или скорости, или ускорения), и при одном колебании тела потенциальная и кинетическая энергии успевают дважды колебаться (превращаться друг в друга) (рис.36.2).

Поскольку как в пружинном маятнике, так и в математическом маятнике колебания являются гармоническими, между их колебаниями должно быть сходство. На рисунке 36.3 изображены аналогичные фазы в гармонических колебаниях этих маятников.

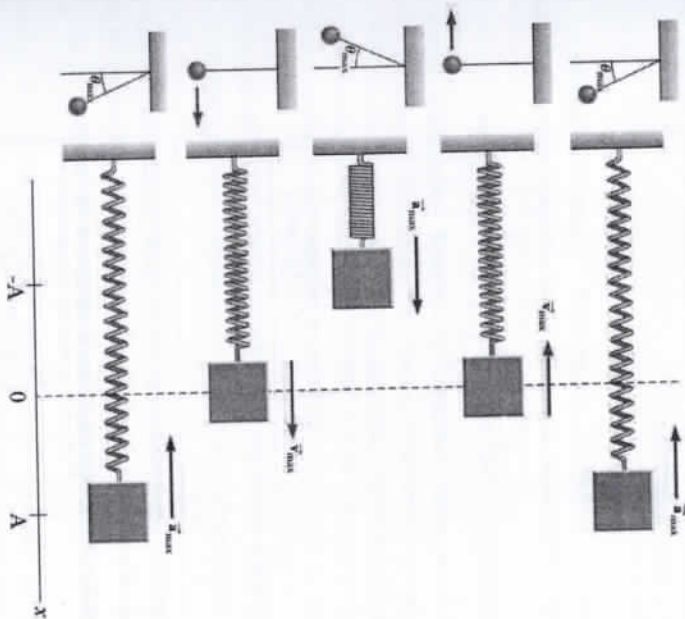


Рисунок 36.3

Частные случаи математического маятника:

Приведенные ниже приведенные формулы относятся к наиболее распространенным задачам, знание этих формул облегчает процесс решения задач.

Если математический маятник установлен на объекте, находящейся неподвижно или движущейся прямолинейно равномерно, период определяется из следующих формул:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}} \quad (36.6)$$

Если математический маятник привязан к другому телу, движущемуся с ускорением, скажем, в лифте, тележке, автомобиле или поезде, то возникает вопрос, какой будет период колебаний маятника. Давайте поинтересуемся, каким будет период колебаний маятника, если математический маятник движется по наклонной плоскости с ускорением.

Мы познакомились с тем, что при движении по наклонной плоскости с ускорением  $a$ , тело имеет вес:

$$P = m \sqrt{g^2 + a^2} + 2ga \sin \alpha$$

Следовательно, период колебаний математического маятника, установленного на тележке, движущейся с ускорением  $a$ , будет равен:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{P/m}} = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{\sqrt{g^2 + a^2} + 2ga \sin \alpha}}$$

Следовательно, если тележка, на которой установлен математический маятник, движется с ускорением вверх по наклонной плоскости, образующей угол  $\alpha$  с горизонтом, период колебаний маятника равно:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{\sqrt{g^2 + a^2} + 2ga \sin \alpha}} \quad (36.7)$$

Из приведенной выше формулы также можно записать для случая, когда вы падаете с ускорением вниз. Для этого достаточно поставить  $-a$  на место угла  $\alpha$ .

Таким образом, если тележка, на которой установлен математический маятник, движется с ускорением вниз по наклонной плоскости, образующей угол  $\alpha$  с горизонтом, период колебаний маятника составит:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{\sqrt{g^2 + a^2} - 2ga \sin \alpha}} \quad (36.8)$$

Приведенная выше формула также может быть написана для случая, когда тело скользит по наклонной плоскости без трения. Ускорение при спуске вниз по наклонному плоскости без трения будет равно:

$$a = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) = g \sin \alpha$$

Из этого мы видим, что период колебаний математического маятника на тележке, скользящей вниз по наклонному плоскости без трения, равен.

$$\begin{aligned} T &= 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{\sqrt{g^2 + (g \sin \alpha)^2 - 2g(g \sin \alpha) \sin \alpha}}} = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{\sqrt{g^2 + g^2 \sin^2 \alpha - 2g^2 \sin^2 \alpha}}} = \\ &= 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{\sqrt{g^2(1 - \sin^2 \alpha)}}} = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g \cos \alpha}} \end{aligned}$$

Следовательно, если тележка, на которой установлен математический маятник, падает без трения по наклонной плоскости, образующей угол  $\alpha$  с горизонтом, период колебаний маятника будет равно:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g \cos \alpha}} \quad (36.9)$$

Если тело, на котором установлен математический маятник, движется с некоторым ускорением вертикально вверх, вертикально вниз или горизонтально, то вместо угла  $\alpha$  в формуле поставим соответствующий  $90^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$ .

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{P/m}} = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{\sqrt{g^2 + a^2} + 2ga \sin \alpha}}$$

Тогда, если мы упростим формулу, у нас будут формулы соответственно.

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g+a}}, \quad T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g-a}}, \quad T_3 = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{\sqrt{g^2 + a^2}}}$$

Следовательно, если математический маятник движется с ускорением  $a$  в вертикальном направлении вверх, в вертикальном направлении вниз и в горизонтальном положении, период колебаний маятника в этих случаях будет следующим:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g+a}}, \quad T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g-a}}, \quad T_3 = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{\sqrt{g^2 + a^2}}} \quad (36.10)$$

Если математический маятник находится в состоянии невесомости (в свободном падении или на космическом корабле), период его колебаний по формуле  $T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g-g}}$  равен  $T \rightarrow \infty$ , то есть маятник перестает колебаться.

Из раздела механики известно, что по мере подъема от поверхности Земли ускорение свободного падения уменьшается. Точно так же по мере проникновения вглубину Земли ускорение свободного падения уменьшается. Из этого можно сделать вывод, что поскольку период колебаний математического маятника зависит от ускорения свободного падения по закону  $T \sim 1/\sqrt{g}$ , период колебаний увеличивается либо по мере того, как он поднимается на высоту от поверхности Земли, либо по мере того, как он входит внутрь Земли. Давайте посмотрим на эти два случая.

Если математический маятник поднимается над поверхностью Земли, период колебаний увеличивается, как численное значение ускорения свободного падения уменьшается. Потому что на высоте Земли притягивает шарик на маятнике слабее.

$$T_h = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

а также значение ускорения свободного падения на высоте  $h$  над поверхностью Земли равна:

$$g_h = g_0 \left( \frac{R}{R+h} \right)^2$$

учитывая, что для высоты  $h$  период колебаний будет выглядеть так.

$$T_h = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g_h}} = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g_0 \left( \frac{R}{R+h} \right)^2}} = 2\pi \frac{\sqrt{\ell}}{\sqrt{g_0}} \frac{R+h}{R} = T_0 \frac{R+h}{R}$$

Следовательно, если период колебаний математического маятника на поверхности Земли равен  $T_0$ , то период колебаний на высоте  $h$  над поверхностью Земли равен  $T_h$ :

$$T_h = T_0 \frac{R+h}{R} \quad (36.11)$$

Если математический маятник движется от поверхности Земли в глубину к центру, период колебаний увеличивается, как численное значение ускорения свободного падения уменьшается. Потому что в глубинах шарик на маятнике притягивается к Земле слабее.

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

а также значение ускорения свободного падения для глубины  $h$  от поверхности Земли

$$g_h = g_0 \frac{R-h}{R}$$

принимая во внимание, что период колебаний для глубины  $h$  будет выглядеть так.

$$T_h = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g_h}} = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g_0 \frac{R-h}{R}}} = 2\pi \frac{\sqrt{\ell}}{\sqrt{g_0}} \frac{R}{R-h} = T_0 \cdot \frac{R}{R-h}$$

Следовательно, если период колебаний математического маятника на поверхности Земли равен  $T_0$ , то период колебаний от поверхности Земли до глубины  $h$  равен  $T_h$ :

$$T_h = T_0 \sqrt{\frac{R}{R-h}}$$

(36.12)

Даны два различных по длине математических маятника, пусть задано определение периода колебаний третьего маятника, равного сумме или вычитанию длин этих маятников. Зная периоды колебаний двух заданных маятников, можно определить их длины. Путем сложения или вычитания найденных длин находят длину третьего маятника.

$$\begin{cases} T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{\ell_1}{g}} \\ T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{\ell_2}{g}} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \ell_1 = \frac{gT_1^2}{4\pi^2} \\ \ell_2 = \frac{gT_2^2}{4\pi^2} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \ell_3 = \ell_1 \pm \ell_2 = \frac{g}{4\pi^2} (T_1^2 \pm T_2^2) \\ \ell_3 = \frac{gT_3^2}{4\pi^2} \end{cases}$$

Далее определяется период колебаний третьего маятника.

$$\frac{gT_3^2}{4\pi^2} = \frac{g}{4\pi^2} (T_1^2 \pm T_2^2), \rightarrow T_3 = \sqrt{T_1^2 \pm T_2^2}$$

Значит,  $\ell_1$  и  $\ell_2$  периоды маятниковых длин соответственно  $T_1$  и  $T_2$  то, период  $T_3$  маятника длины  $\ell_3 = \ell_1 \pm \ell_2$  будет равен:

$$T_3 = \sqrt{T_1^2 \pm T_2^2}$$

(36.13)

Учитывая, что даны два маятника разной длины, и известно, что за какой-то промежуток времени один из них колебался  $N_1$  раз, а другой раз  $N_2$ , запишите формулируем формулу, связывающую заданные величины.

В этом и определяются периоды колебаний маятников.

$$T_1 = \frac{t}{N_1} = 2\pi \sqrt{\frac{\ell_1}{g}} \quad \text{ва} \quad T_2 = \frac{t}{N_2} = 2\pi \sqrt{\frac{\ell_2}{g}}$$

Находим время  $t$  следующим виде:

$$t = 2\pi N_1 \sqrt{\frac{\ell_1}{g}} \quad \text{ва} \quad t = 2\pi N_2 \sqrt{\frac{\ell_2}{g}}$$

Приведя и упрощая эти времена, получим выражение.

$$2\pi N_1 \sqrt{\frac{\ell_1}{g}} = 2\pi N_2 \sqrt{\frac{\ell_2}{g}}, \rightarrow \frac{t}{N_1} = \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

Следовательно, выражение, связывающее величины, заданные для маятников длин  $\ell_1$  и  $\ell_2$ , колеблющихся в  $N_1$  и  $N_2$  раз за равные промежутки времени, будет следующим:

$$\frac{\ell_2}{\ell_1} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

(36.14)

При малых колебаниях оказывается, что период колебаний физического маятника (а также пружинного и математического маятника) не зависит от амплитуды его колебаний. Колебания, период колебаний которых не зависит от амплитуды, называются изохронными колебаниями. Изохронность маятников помогает использовать их в качестве измерительных приборов времени. При отклонениях  $\delta - 10^\circ$  и более изохронность маятника нарушается.

Для всех гармонически колеблющихся маятников применимо следующее расуждение (рис. 36.3):

Тело, выведенное из положения равновесия, проходит первую половину амплитуды за время  $T/6$ , следующую половину за время  $T/12$ , а ноль амплитуды проходит за время  $T/4$ .

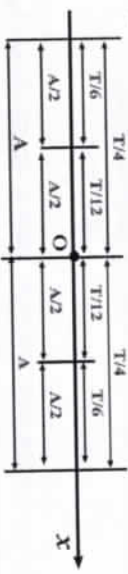


Рисунок 36.3

Для математического маятника можно привести еще множество характерных формул.

Вопросы по теме:

1. Почему движение математического маятника называют гармоническим колебанием?
2. Запишите формулы периода, частоты и циклической частоты колебаний математического маятника.
3. Запишите уравнения зависимости координат, скорости и ускорения от времени для математического маятника. Запишите амплитуды скорости и ускорения.
4. Выведите формулу зависимости скорости и ускорения математического маятника от координаты и постройте график.
5. Запишите кинетическую, потенциальную и полную энергии для математического маятника.
6. Вывести формулу и постройте график зависимости кинетической и потенциальной энергии математического маятника от координат.
7. Какими будут периоды колебаний маятника на высоте или глубине от поверхности Земли?
8. Какие формулы можно написать для математического маятника с ускоренным движением?

**Решение задачи:**

1. Закон колебаний математического маятника при малых колебаниях дан в виде  $x = 0,03 \sin \frac{2\pi}{T} t$ . Найдите модуль его смещения в момент  $t = 3T/4$  (м).

- A) 0,05    B) 0,04    C) 0,03    D) 0,02

Дано:

$$x = 0,03 \sin \frac{2\pi}{T} t$$

$$t = \frac{3T}{4}$$

$$|x| = ?$$

Решение:

В заданном гармоническом уравнении вместо времени ставим заданное значение:

$$|x| = 0,03 \sin \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{3T}{4} = 0,03 \sin \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{3T}{4} = |-0,03| = 0,03 \text{ м}$$

Ответ: C)

2. В каких фазах сдвиг будет равен амплитуды по модулю  $\frac{\sqrt{2}}{2}$ ? Колебания происходят по закону косинуса.

Дано:

$$x = \frac{\sqrt{2}}{2} x_m \cos \varphi$$

$$\varphi = ?$$

Решение:

Запишем уравнение колебаний:  
 $x = x_m \cos(\omega t + \varphi_0) = x_m \cos \varphi$

Ставим заданные величины в уравнение

$$\frac{\sqrt{2}}{2} x_m = x_m \cos \varphi$$

Ответ:  $\pm \frac{\pi}{4} \pm \pi$

3. Период колебаний одного из двух математических маятников равен 0,5 с. Какое будет период колебаний второго маятника (с). Если первый маятник колебался 6 раз, а второй колебался 4 раза?

Дано:

$$T_1 = 0,5 \text{ с}$$

$$N_1 = 6$$

$$N_2 = 4$$

$$t_1 = t_2 = t$$

Решение:

Воспользуемся формулой зависимости периода колебаний к числу колебаний.

$$T_1 = \frac{t}{N_1}, \quad T_2 = \frac{t}{N_2}$$

Из них получаем соотношение.

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\frac{t}{N_1}}{\frac{t}{N_2}} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{4}{6} = \frac{2}{3}, \quad \rightarrow \quad T_2 = \frac{3T_1}{2} = \frac{3 \cdot 0,5}{2} = 0,75 \text{ с}$$

Ответ: 0,75 с

**§ 37. СЛОЖЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ.**

Материальная точка может участвовать в нескольких колебаниях одновременно. В этом случае необходимо сложить колебания для определения результирующего уравнения движения и его проекции. В результате образуется более сложное колебание, а его характер будет



зависеть от фаз, частот и амплитуд сопутствующих колебаний. Рассмотрим подробнее несколько случаев сложения гармонических колебаний.

**Сложение двух когерентных колебаний, лежащих в одной плоскости:**

Когерентными колебаниями называют колебания, частоты которых одинаковы или отличаются друг от друга на бесконечно малую величину, а разность фаз не изменяется во времени. Пусть материальная точка участвует в этих двух колебаниях, лежащих на одной прямой.

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_{01}) \quad \text{и} \quad x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_{02})$$

Здесь:  $\omega$  – циклическая частота обоих колебаний, равная;  $\varphi_{01}$  и  $\varphi_{02}$  – начальные фазы первого и второго колебаний соответственно.

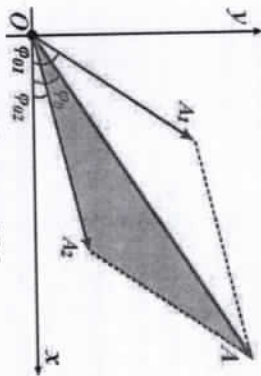


Рисунок 37.1

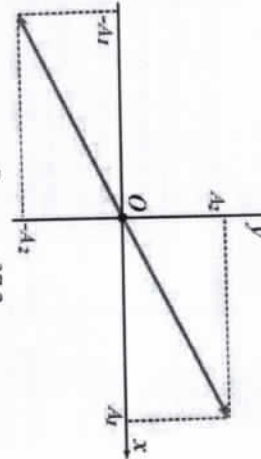


Рисунок 37.2

Для сложения колебаний и определения закона результирующих колебаний воспользуемся векторной диаграммой (рис.37.1).

Для этого можно получить векторы  $\vec{A}_1$  и  $\vec{A}_2$ , образующие начальные углы  $\varphi_{01}$  и  $\varphi_{02}$  соответственно и вращающиеся вокруг начала координат с неизменной угловой скоростью  $\omega$  и с положительным направлением оси  $Ox$ .

$A$  при вращении векторов  $\vec{A}_1$  и  $\vec{A}_2$  вокруг точки  $O$  диагональ параллелограмма, построенного на векторах, также совершает вращательное движение. Как видно из рисунка 37.1, уравнение результирующего гармонического колебательного движения должно иметь следующий вид.

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (37.1)$$

Амплитуду результирующего колебания можно определить, применив теорему косинусов для треугольника, изображенного на рисунке.

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_{02} - \varphi_{01})} \quad (37.2)$$

$A$  начальная фаза результирующего колебания определяется с помощью тангенса угла.

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{A_1 \sin \varphi_{01} + A_2 \sin \varphi_{02}}{A_1 \cos \varphi_{01} + A_2 \cos \varphi_{02}} \quad (37.3)$$

Здесь:  $\varphi_{02} - \varphi_{01}$  – это разница между начальными фазами двух колебаний, величина которых неизменна во времени.

Если колебания складываются в одной фазе, то есть разность фаз  $\varphi_{02} - \varphi_{01} = 0, 2\pi, 4\pi, \dots, 2n\pi$ , то результирующая амплитуда будет следующей.

$$A = A_1 + A_2 \quad (37.2a)$$

В приведенной выше формуле можно записать, что для случая, когда в одну и ту же фазу складываются колебания, равные по амплитуде.

$$A = 2A_1 \quad (37.2b)$$

Если колебания складываются в противоположную фазу, то получается разность фаз  $\varphi_{02} - \varphi_{01} = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots, (2n+1)\pi$ , а результирующая амплитуда будет следующей.

$$A = A_1 - A_2 \quad (37.2c)$$

В приведенной выше формуле можно записать, что для случая, когда в противоположную фазу складываются равные по амплитуде колебания.

$$A = 0 \quad (37.2d)$$

**Сложение взаимно перпендикулярных колебаний:**

Теперь рассмотрим случай, когда материальная точка одновременно участвует во взаимно перпендикулярных колебаниях в двух направлениях.

При этом рассмотрим следующие случаи:

$$1) \text{ Циклические частоты и фазы одинаковы, но амплитуды различны} \\ x = A_1 \sin(\omega t + \varphi_0) \quad \text{и} \quad y = A_2 \sin(\omega t + \varphi_0)$$

при сложении этих колебаний уравнение траектории результирующего движения материальной точки будет иметь следующий вид.

$$y = \frac{A_2}{A_1} x \quad (37.4)$$

Это уравнение прямой, при котором колебание происходит по прямой, проходящей через начало координат (рис.37.2). В этом и будет происходить результирующий сдвиг:

$$s = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \sin(\omega t + \varphi_0) = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (37.5)$$

Здесь:  $A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}$  – результирующая амплитуда колебаний.

2) Попробуем сложить два взаимно перпендикулярных колебания с одинаковыми частотами, с разными фазами на  $\pi/2$ , с разными амплитудами. При этом их уравнения будут иметь следующий вид.

$$x = A_1 \sin(\omega t + \varphi_0) \quad \text{и} \quad y = A_2 \sin(\omega t + \pi/2 + \varphi_0)$$

Принесенные выше уравнения также можно записать в этом виде.

$$\frac{x}{A_1} = \sin(\omega t + \varphi_0) \quad \text{и} \quad \frac{y}{A_2} = \cos(\omega t + \varphi_0)$$

Это уравнение траектории будет сформировано путем возведения уравнений в квадрат, а затем сложением.

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1 \quad (37.6)$$

Следовательно, траектории колебания, образованная сложением таких колебаний, будет состоять из эллипса (рис.37.3).

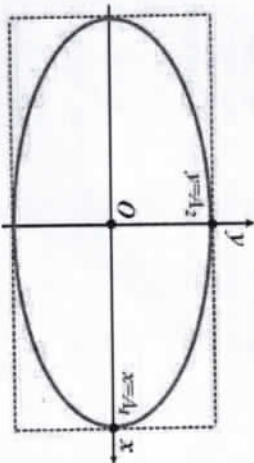


Рисунок 37.3

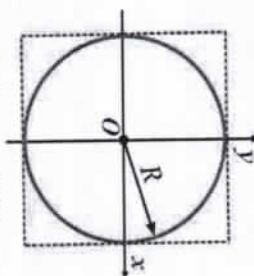


Рисунок 37.4

Из приведенного выше уравнения эллипса можно рассмотреть еще один частный случай. Если амплитуды колебаний равны ( $A_1 = A_2 = R$ ), то уравнение эллипса становится уравнением окружности (рис.37.4).

$$x^2 + y^2 = R^2 \quad (37.6a)$$

Следовательно, вращательное движение, которое мы проходили в разделе кинематики, также является сложением двух перпендикулярных колебательных движений.

**Появление затухающих и вынужденных колебаний:**

Если колебания возникают после выхода тела из состояния равновесия под действием сил внутренней силы и сопротивления движению, такое колебание называется затухающей колебанием. При этом на колеблющееся тело действует сила трения поверхности или сила сопротивления среды, постепенно гасящая амплитуду колебаний. Пусть сила сопротивления среды зависит от 1-й степени скорости ( $F_{\text{сопр}} = -\alpha \dot{x}$ ). При этом тело движется с переменным ускорением под действием силы упругости и силы сопротивления. Для сил можно записать выражение:

$$m\ddot{x} = -kx - \alpha \dot{x} \quad \text{или} \quad m\ddot{x} + kx + \alpha \dot{x} = 0$$

Зная, что скорость является производной 1-го порядка от координаты, а ускорение-производной 2-го порядка, приведенное выше уравнение можно записать в виде:

$$m\ddot{x} + \alpha \dot{x} + kx = 0$$

Разделим обе части этого уравнения на массу, то получим следующее уравнение:

$$\ddot{x} + \frac{\alpha}{m} \dot{x} + \frac{k}{m} x = 0 \quad (37.7)$$

Решением этого уравнения будет уравнение затухающей колебаний. График убывающей колебания изображен на рисунке 37.5.

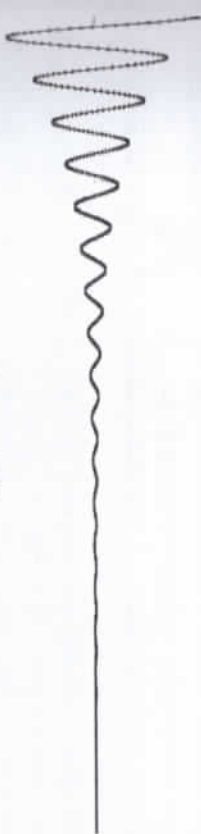


Рисунок 37.5

Если колебания возникает под действием внешней вынуждающей силы, такую колебанию называют вынужденной колебанием. При этом на колеблющееся тело помимо внутренней силы и силы трения поверхности или сопротивления среды действует и внешняя вынужденная сила.

Пусть внешняя вынуждающая сила действует также по закону, подчиняясь гармоническому закону  $F = F_0 \sin \omega t$ . При этом тело движется с переменным ускорением под действием силы упругости, силы сопротивления и вынужденной силы.



Рисунок 37.6

Для сил можно записать выражение.

$$m\ddot{x} = -kx - \alpha \dot{x} + F_0 \sin \omega t \quad \text{или} \quad m\ddot{x} + kx + \alpha \dot{x} = F_0 \sin \omega t$$

Зная, что скорость является производной 1-го порядка от координаты, а ускорение-производной 2-го порядка, приведенное выше уравнение можно записать в виде:

$$m\ddot{x} + \alpha \dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t$$

Разделим обе части этого уравнения на массу, то получим следующее уравнение:

$$\ddot{x} + \frac{\alpha}{m} \dot{x} + \frac{k}{m} x = \frac{F_0}{m} \sin \omega t \quad (37.8)$$

Решением этого уравнения будет уравнение вынужденной колебании. График убывающей колебания изображен на рисунке 37.6.

**Понятие резонанса:**

Это явление наблюдается в основном при вынужденных колебаниях. По мере того, как частота колебаний внешней вынуждающей силы приближается к частоте внутренних частых колебаний, их колебательные ритмы становятся синхронизированными.

По мере уменьшения разности между ними амплитудное значение колебания увеличивается. При полном исчезновении разности и выравнивании внешних частот происходит резкое увеличение амплитуды. Это явление называется резонансом (рис.37.8).

При колебании подвешенного на нити шара, когда его слегка толкают при каждом колебании в соответствии с собственным небольшим колебанием шара, постепенно амплитуда увеличивается, создавая большую колебанию с усилением. При этом повышенная сила натяжения создает риск обрыва нити.

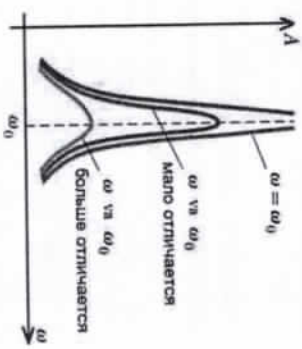


Рисунок 37.8

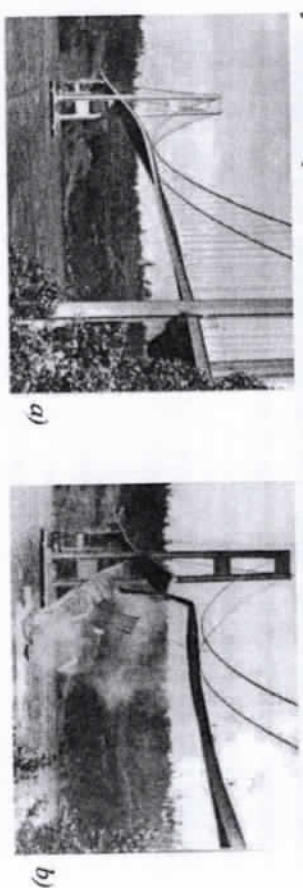


Рисунок 37.9

Аналогичным образом, когда солдаты перемешаются по мостам быстрыми шагами, колебательное движение увеличивается, когда частичная колебания моста приближается к частоте шагов солдат, что создает опасность разрушения моста. Поэтому солдат с моста проносятся в разобранном виде. Поэтому при расчетах различных конструкций и сооружений планируется их характеристику частную частоту максимально далекой от частот внешних воздействующих сил. Ярким примером печального исхода резонансного события является снос подвешенного моста Такома в Вашингтоне, округ Колумбия, в 1940 году. При этом происходит сильное качание моста, когда частота турбулентности ветра приближается к

частоте колебаний моста. В результате на мосту появляются трещины и мост обрушивается (рис.37.9).

Явление резонанса также имеет свои преимущества. С помощью этого явления можно получить колебания большой амплитуды даже при небольшой вынужденной силе. Благодаря резонансу, возникающему в звуковых волнах, можно усилить слабые звуки, а в радиотехнике-слабые электрические колебания.

**Вопросы по теме:**

1. Как складываются колебания, которые взаимно когерентны и имеют равные частоты?
2. Как складываются между собой круглые и с разной амплитудой колебания? В какой форме будет находиться траектория при этом?
3. Как складываются взаимно перпендикулярные и с одинаковой амплитудой колебания? В какой форме будет находиться траектория при этом?
4. Как образуются затухающие колебания? Изобразите его график.
5. Как образуются вынужденные колебания? Изобразите его график.
6. Что такое резонанс? Опишите его пользу и вред.

**Решение задач:**

1. Точка участвует в двух колебаниях. Эти колебания подчиняются к законам  $x_1 = 12 \cos(3\pi t + \pi/6)$  [см] и  $x_2 = 5 \cos(3\pi t + \pi/2)$  [см]. Запишите амплитуду, начальную фазу и уравнение движения колебания, возникающей в результате сложения двух колебаний

**Дано:**

$$x_1 = 12 \cos\left(3\pi t + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$x_2 = 5 \cos\left(3\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$$

**Решение:**

Определим амплитуду результирующего колебания.

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_{02} - \varphi_{01})} = \sqrt{12^2 + 5^2 + 2 \cdot 12 \cdot 5 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{6}\right)} = \sqrt{144 + 25 + 60} \approx 15,13 \text{ см}$$

$A = ?$ ,  $\varphi_0 = ?$   
 $x = x(t) = ?$   
 А начальная фаза результирующего колебания определяется с помощью тангенса угла.

$$\text{tg}\varphi_0 = \frac{A_1 \sin \varphi_{01} + A_2 \sin \varphi_{02}}{A_1 \cos \varphi_{01} + A_2 \cos \varphi_{02}} = \frac{12 \sin \frac{\pi}{6} + 5 \sin \frac{\pi}{2}}{12 \cos \frac{\pi}{6} + 5 \cos \frac{\pi}{2}} = \frac{12 \cdot \frac{1}{2} + 5 \cdot 1}{12 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} + 5 \cdot 0} = \frac{11}{6\sqrt{3}} = 1,058.$$

$\varphi_0 = \arctg(1,058) = 46,63^\circ = 0,814 \text{ рад}$

Запишем уравнение результирующей колебания.

$$x = A \cos(\omega t + \varphi_0) = 15,13 \cos(3\pi t + 0,814) \text{ [см]}$$

**Ответ:**  $A = 15,13 \text{ см}$ ;  $\varphi_0 = 0,814 \text{ рад}$ ;  $x = 15,13 \cos(3\pi t + 0,814) \text{ см}$

*Что такое механическая волна?*

Когда мы говорим о волне, мы сразу же сталкиваемся с волной, распространяющейся по поверхности воды. Потому что с детства мы много раз были свидетелями того, как вокруг места погружения возникают волны в виде кругов, когда мы видим человека, который ныряет (sho'ng'igan) в бассейне.

Вообще говоря, механической волной называют процесс распространения механических колебаний во времени в упругой среде. Отдельно стоит отметить, что при этом молекулы среды не двигаются, а колеблются вокруг своего равновесия.

Типы волн разнообразны, а волны, распространяющиеся в упругой среде, являются механическими волнами.

Рассмотрим простейший способ образования механической волны (рис.38.1). Когда возбуждающий импульс генерируется, удерживая один конец за другой конец шнура или веревки, прикрепленной к стене, и встряхивая его вверх и вниз, этот импульс со временем движется вправо, создавая распространение волны. При этом здесь частицы веревки или шнура не движутся вдоль волны, а колеблются вокруг своего равновесного положения. При этом все частицы не колеблются синхронно с одной и той же фазой, а последовательно переносятся из одной точки в другую. Эти несинхронные колебания частиц среды создают механическую волну.

*Продольные и поперечные волны:*

В зависимости от взаимного соотношения направлений колебаний и распространения волны делятся на два вида: продольные и поперечные волны. Если направление колебаний частиц среды перпендикулярно направлению распространения волны, такая волна называется поперечной волной. Если направление колебаний частиц среды параллельно направлению распространения волны, такая волна называется продольной волной.

Образование поперечных волн можно наблюдать с помощью эластичного шнура (рис.38.2). Закрепив один конец эластичного шнура или веревки на стене и периодически вибрируя другим концом, мы увидим распространение поперечной волны по шнуру или веревке. В то время как волна распространя-

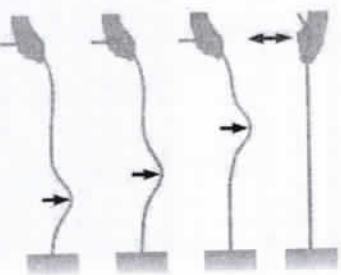


Рисунок 38.1

ется вправо, частицы среды, в частности выбранная точка P, совершают колебательное движение вокруг своей точки равновесия по вертикали. Но частицы среды не движутся вдоль волны. Так как направление колебаний частиц среды является поперечным направлением распространения волны, мы также называем такие волны поперечными волнами. Кроме того, волны, распространяющиеся по поверхности воды, также являются поперечными волнами.

Образование продольных волн можно наблюдать при помощи мятой (с небольшой жесткостью) пружины (рис.38.3). Когда пружину продувают вдоль ее оси, мы видим, что на катушках образуется плотный слой, и этот слой проходит вдоль оси пружины. А при последовательном ударе мы видим, что волна распространяется вдоль оси пружины в последовательности плотных и разреженных слоев. При этом, хотя волна распространяется в правую сторону, частицы среды совершают колебательное движение вокруг своей оси горизонтально. Но частицы среды не движутся вдоль волны. Так как направление колебаний частиц среды находится в направлении распространения волны, мы также называем такие волны продольными волнами. Кроме того, все виды звуковых волн также являются продольными волнами.

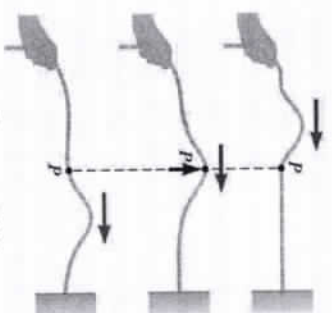


Рисунок 38.2

При землетрясении наблюдаются оба типа волн, продольные и поперечные волны. При этом с поверхности Земли из точки внутри наружу начинают одновременно распространяться сферический оба вида прежмерных волн. Из этих двух быстрее распространяется продольная волна, скорость которой в поверхностном слое Земли находится в пределах 7-8 км/ч. В результате на сейсмографе (устройстве, используемом для регистрации землетрясения) сначала регистрируется продольная волна, и поэтому эта волна называется первичной волной. Поперечная волна, которая распространяется медленнее, называется вторичной волной. Вторичная волна распространяется в поверхностных слоях земной коры со скоростью 4-5 км/ч и позднее регистрируется на сейсмографе. В зависимости от времени измерения определяется расстояние до центра землетрясения. На основании



Рисунок 38.3

записей, сделанных на нескольких сейсмологических станциях и переданных им сферических поверхностей, определяется очаг землетрясения — эпицентр.

*Волновая поверхность, волновой фронт, амплитуда волны, частота и длина волны:*

Форма волн характеризуется волновой поверхностью, волновым фронтом. Волновой поверхностью называют геометрическое место точек, колеблющихся в одной фазе. В зависимости от формы источников волн волновые поверхности также будут выглядеть по-разному. Например, в плоской волне волновые поверхности состоят из плоскостей (рис. 38.4-а).

Линии, проведенные в нормальном направлении к волновой поверхности, называются волновым пучком. Направление луча совпадает с направлением распространения волны. Энергия источника волны распространяется по всему свету. В плоской волне лучи состоят из параллельных направленных линий (рис. 38.4-а).

Поскольку при распространении плоских волн размер волновой поверхности не изменяется по мере удаления от источника, энергия плоской волны не рассеивается в пространстве, то есть поверхностная плотность энергии плоской волны не изменяется (при отсутствии трения). Но амплитуда колебаний уменьшается из-за действия сил трения и сопротивления. Если волновая поверхность состоит из сферы, такую волну называют сферической волной (рис. 38.4-б). Такая волна образуется от источника, состоящего из пульсирующей сферы, расположенной внутри среды. Волновые поверхности в этом случае состоят из концентрических сфер, а лучи направлены вдоль продолжения радиусов сфер.

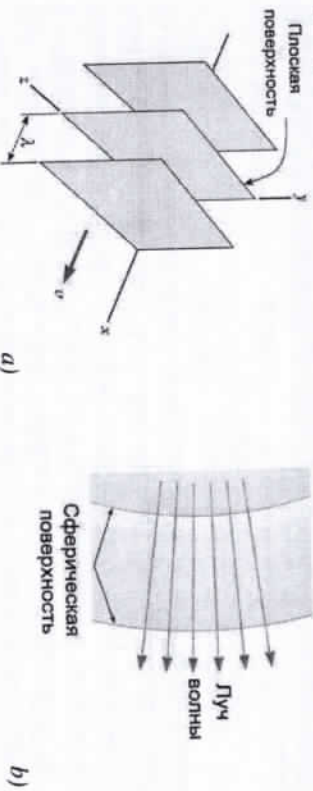


Рисунок 38.4

Сферические волны при распространении волн амплитуды колебаний частиц среды уменьшаются за счет действия сил трения и сопротивления. Энергия источника сферической волны равномерно распределяется по поверхности сферы, в то время как поверхность сферы резко увеличивается

по мере распространения волны. Следовательно, по мере удаления сферической волны от источника поверхностная плотность энергии волны резко уменьшается.

Самая передняя поверхность волны, т. е. самая удаленная от источника волна, называется волновым фронтом. Другими словами, волновым фронтом называется поверхность, на которой волна достигла возмущения (to 'qin b'ladon) и только начинает колебаться частица среды. Следовательно, оказывается, что волновой фронт состоит из поверхности, разделяющей часть среды, занятую волной, и часть среды, в которой волна не существует.

В среде с одинаковыми свойствами во всех направлениях, то есть в изотропной среде, фронт волны движется с неизменной скоростью. Поэтому при распространении волны период и частота колебаний каждой частицы среды равны периоду и частоте колебаний источника волны (рис. 38.6).

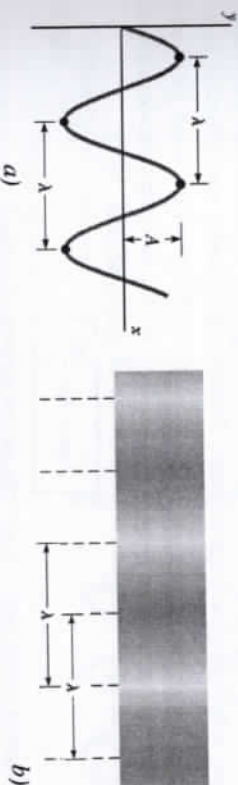


Рисунок 38.5

Величина, характеризующая сдвиг волновой поверхности, т. е. фазы волны в пределах одного периода, в зависимости от характера среды и частоты колебаний, называется длиной волны (рис. 38.5-а). Точки в пучке волны, соответствующие времени повторяющихся периодов, колеблются в одних и тех же фазах, следовательно, длину волны в общем виде можно описать следующим образом:

*Длиной волны называют расстояние между соседними точками, лежащими в одном луче и колеблющимися в одной фазе.*

В поперечной волне длина волны  $\lambda$  равна расстоянию между двумя соседними глубинной или между двумя соседними выпуклостями (рис. 38.5-а).

$\lambda$  в продольной волне длина волны равна расстоянию между центрами двух соседних плотных слоев или двух соседних разреженных слоев (рис. 38.5-б). Время, затрачиваемое на прохождение одной

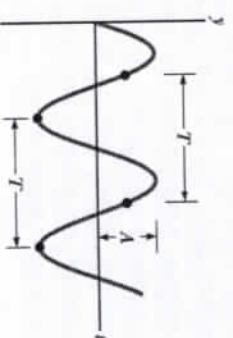


Рисунок 38.6

длины волны, называется периодом волны и обозначается  $T$  (рис. 38.6).

Расстояние до наибольшего отклонения частиц колеблющейся среды от равновесного состояния называется амплитудой волны (рис. 38.5-а; рис. 38.6). В поперечных волнах, распространяющихся по шнуру или нити или распространяющихся по поверхности воды, половину расстояния между выпуклостью и глубиной можно назвать амплитудой волны.

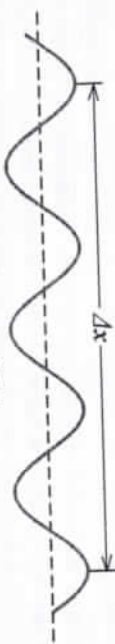


Рисунок 38.7

Известно, что при распространении волны частицы упругой среды, расположенные вдоль луча волны, колеблются в разных фазах. Поскольку возмущения передаются из одной точки в соседнюю точку в какой-то момент времени, возникает разность фаз. Разность фаз между колебаниями двух произвольных точек волны  $\Delta\varphi$  прямо пропорциональна расстоянию  $\Delta x$  между этими точками. Разность фаз колебаний двух точек, распространяющихся на расстоянии  $\Delta x$  друг от друга, определяется по формуле (рис. 38.7):

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta x}{\lambda} \quad (38.1)$$

**Волновое уравнение. Скорость распространения волн:**

Предположим, что импульс возмущения в шнуре или сетке движется вправо, как на рисунке 38.8-а, на рисунке изображена форма и положение импульса в момент времени  $t=0$ . В это время форма импульса определяется математической функцией  $y(x,0) = f(x)$ .

Эта функция представляет собой поперечное смещение  $y$  у элемента шнура или струны при произвольном значении  $x$  в момент времени  $t=0$ .

За счет скорости возмущающего импульса  $v$  через  $t$  времени импульс смещается вправо на расстояние  $\Delta x = vt$  (рис. 38.8-б).

Мы считаем, что форма импульса не меняется со временем. Следовательно, формы импульса в моменты времени  $t=0$  и  $t$  абсолютно одинаковы, только смещен на расстояние  $\Delta x = vt$ .

Следовательно, формы импульса в моменты времени  $t=0$  и  $t$  абсолютно одинаковы, только смещен на расстояние  $\Delta x = vt$ . Следовательно, сдвиг  $y$  в одинаковы, только смещен на расстояние  $\Delta x = vt$ . Следовательно, сдвиг  $y$  в координате  $x$  в момент времени  $t$  точно такой же, как сдвиг  $y$  в координате  $x-vt$  в момент времени  $t=0$ .

$$y(x,t) = y(x - vt, 0)$$

В общем случае мы можем выразить смещение  $y$  для произвольной координаты  $x$  и произвольного времени  $t$  относительно начала координат следующим образом:

$$y(x,t) = f(x - vt) \quad (38.2)$$

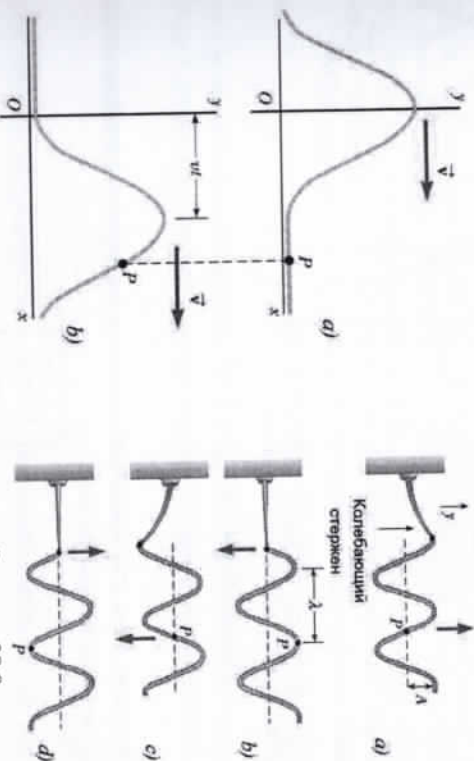


Рисунок 38.8

Рисунок 38.9

Если импульс возмущения на рисунке 38.8 движется вправо, то приведенное выше выражение принимает следующий вид:

$$y(x,t) = f(x + vt) \quad (38.3)$$

Для уравнения, найденные выше, называются волновыми уравнениями. В этом уравнении поперечный сдвиг  $y$  зависит от двух переменных, а именно от переменных  $x$  и  $t$ .

Волна, с которой мы чаще всего сталкиваемся в природе, является синусоидальной (гармонической) волной. Форма этой волны похожа на график функции  $y = \sin x$  или  $y = \cos x$ . Простой способ формирования синусоидальной волны приведен на рисунке 38.9. При этом один конец длинной веревки или шнура привязывается к другому концу стержня, один конец которого прикреплен к стене. Гармоническое колебательное движение возникает под действием силы упругости, когда конец стержня, к которому привязана веревка или шнур, отстучивается из положения равновесия. При этом колебательное движение начинает распространяться вправо с некоторой скоростью через веревку или шнур (рис. 38.9). В результате возникает синусоидальная механическая волна. Но произвольная точка веревки или шнура, скажем, выбранная точка  $P$  на рисунке, будет колебаться

гармонически, как наконецчик стержня. Давайте приведем это уравнение синусоидальной механической волны и другие величины.

На рисунке 38.10 представлены изображения синусоидальной волны при  $t=0$  и произвольном  $t$ -моменте времени.

Пусть в виде функции  $y(x,0) = A \sin kx$  определим значение константы  $k$ , используя тот факт, что функция становится нулевой, когда  $x=0$  и  $x=\lambda/2$ , зная, что известные из математики нули синуса являются  $\pi$ .

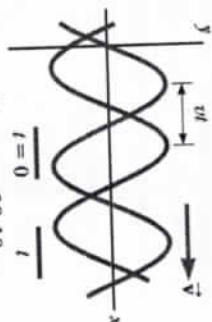


Рисунок 38.10

$$y(0,0) = A \sin(k \cdot 0) = 0, \quad k \neq 0$$

$$y\left(\frac{\lambda}{2}, 0\right) = A \sin\left(k \cdot \frac{\lambda}{2}\right) = 0, \rightarrow k \cdot \frac{\lambda}{2} = \pi, \rightarrow k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Найденное здесь значение  $k$  называется циклическим волновым числом или круговым волновым числом.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (38.4)$$

*Циклическое волновое число — это величина, которая указывает, сколько волн находится на длине  $2\pi$  метров.*

Следовательно,  $t=0$  момент синусоидальной волны на рисунке 38.10 волновой функции имеет вид.

$$y(x,0) = A \sin kx = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right)$$

Но нас интересует волноводная функция в произвольный момент времени  $t$ . Произвольная волна в момент времени  $t$  будет смещена вправо на расстояние  $\Delta x = vt$  по сравнению с волной в момент времени  $t=0$ . Поэтому волновое уравнение в произвольный момент времени  $t$  можно записать в виде.

$$y(x,t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right) \quad (38.5)$$

$$v = \frac{\Delta x}{t} = \frac{\lambda}{T}$$

Здесь скорость

$$y(x,t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}\left(x - \frac{t}{T}\right)\right) \quad (38.5a)$$

Если учесть, что циклическая частота, то волновое уравнение также можно записать в виде.

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

$$y(x,t) = A \sin(kx - \omega t) \quad (38.6)$$

Скорость распространения волны в изотропной среде неизменна и зависит только от свойств и состояния среды. Следовательно, расстояние распространения волны  $s$  определяется по формуле пути при равномерном движении.

$$s = vt$$

Здесь  $v$  — скорость распространения волны,  $t$  — время распространения волны.

Если в приведенной выше формуле время распространения волны  $t$  равно ее периоду  $T$ , расстояние распространения  $s$  остается равным длине волны  $\lambda$ .

$$\lambda = vt$$

$$T = \frac{\lambda}{v} \text{ скорость распространения волны имеет вид:}$$

$$v = \lambda \nu \quad (38.7)$$

Таким образом, получается, что скорость распространения волны равна произведению длины волны на частоту. Скорость распространения волны в упругой среде также может быть записана в виде через циклическую частоту и циклическое волновое число.

$$v = \frac{\omega}{k} \quad (38.8)$$

Вопросы по теме:

1. Что называется механической волной? Что такое волновой фронт?
2. Дать определение понятиям плоская волна и сферическая волна.
3. Дать определение понятиям поперечная волна и продольная волна?
4. Приведите примеры поперечных и продольных волн и объясните их.
5. Запишите формулу скорости волны.
6. Как рассчитывается разность фаз между колебаниями двух произвольных точек волны?

#### Решение задач:

1. Сколько метров длина волны, если она проходит расстояние 70 м волна, распространяющаяся в упругой среде до тех пор, пока частицы среды не колеблются в 35 раз?

- A) 0.5 B) 1 C) 2 D) 20 E) 35

**Дано:**  $s = 70$  м  
 $N = 35$   
 $\lambda = ?$

**Решение:** Чтобы найти длину волны, нам нужно разделить путь, пройденный волной, на количество колебаний

$$\lambda = \frac{s}{N} = \frac{70}{35} = 2 \text{ м}$$

**Ответ:** С)

2. Из-за волны, распространяющейся по поверхности воды, пробка вибрировала 5 раз за 10 с. Какова скорость его распространения, если расстояние между двумя соседними выпуклостями волны равно 1 м? Если частицы среды колеблются с амплитудой 12 см, то какое плоское волновое уравнение для этой волны?

**Дано:**  
 $t = 5$  с  
 $N = 10$   
 $\lambda = 1$  м  
 $v = ?$

**Решение:** Скорость волны находим по:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{\lambda}{t} = \frac{N\lambda}{t} = \frac{10 \cdot 1}{5} = 2 \text{ м/с}$$

Здесь мы использовали формулу  $T = \frac{t}{N}$

Теперь составим волновое уравнение:

$$y(x,t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right) = 0,15 \text{ м} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{1 \text{ м}}(x - 2 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot t)\right) = 0,15 \sin(2\pi x - 4\pi t) \text{ [м]}$$

**Ответ:**  $y = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;  $y(x,t) = 0,15 \sin(2\pi x - 4\pi t)$  [м];

3. Импульс возмущения движется вправо вдоль оси Ox в соответствии со следующим уравнением движения:

$$y(x,t) = \frac{2}{(x-3t)^2 + 1}$$

Здесь координаты  $y$  и  $x$  измеряются в сантиметрах, а время  $t$  в секундах. Построить волновую функцию для моментов времени  $t=0$  с,  $t=1$  с и  $t=2$  с и описать их графики.

**Решение:** Для  $t=0$  с времени волновая функция имеет вид.

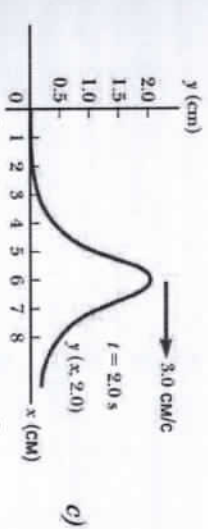
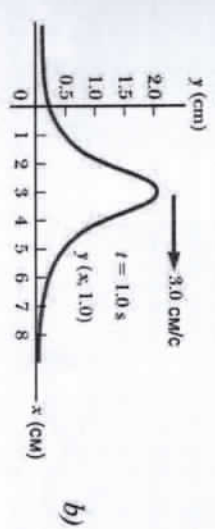
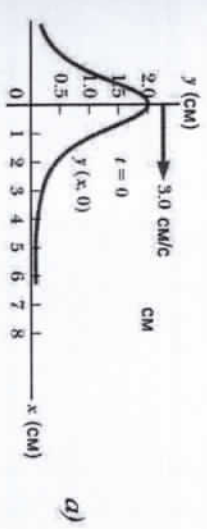
$$y(x,0) = \frac{2}{(x-3 \cdot 0)^2 + 1} = \frac{2}{x^2 + 1}$$

График этой функции симметричен относительно прямой  $x=0$  (то есть оси Oy) и принимает максимальное значение, равное  $y=2$  в точке  $x=0$ . Исходя из этого, для  $t=0$  с время появления импульса будет таким же, как на рисунке А.

Для  $t=1$  с времени волновая функция имеет вид.

$$y(x,1) = \frac{2}{(x-3 \cdot 1)^2 + 1} = \frac{2}{(x-3)^2 + 1}$$

График этой функции симметричен относительно прямой  $x=3$  и принимает максимальное значение, равное  $y=2$  в точке  $x=3$ . Исходя из этого, для времени  $t=1$  с появление импульса будет таким же, как на рисунке В.



Для  $t=2$  с волновая функция времени имеет вид.

$$y(x,2) = \frac{2}{(x-3 \cdot 2)^2 + 1} = \frac{2}{(x-6)^2 + 1}$$

График этой функции симметричен относительно прямой  $x=6$  и принимает максимальное значение, равное  $y=2$  в точке  $x=6$ . Исходя из этого, для  $t=2$  с время появления импульса будет таким же, как на рисунке С.

На представленных выше 3 волновых функций и их графиков видно, что импульс возмущения движется вправо со скоростью  $v=3$  км/с.

**Ответ:**  $y(x,0) = \frac{2}{x^2 + 1}$ ;  $y(x,1) = \frac{2}{(x-3)^2 + 1}$ ;  $y(x,2) = \frac{2}{(x-6)^2 + 1}$



*Отражение, преломление и преломление механических волн:*

Модель бегущей волны описывает волну в однородной среде, которая не подвергается взаимодействию в направлении распространения. Давайте проверим, что происходит, если волна, распространяющаяся в упругой среде, подвергается некоторому воздействию.

Модель бегущей волны описывает волну в однородной среде, которая не подвергается взаимодействию в направлении распространения. Давайте проверим, что происходит, если волна, распространяющаяся в упругой среде, подвергается некоторому воздействию. Возьмем, к примеру, волну, распространяющуюся по веревке, один конец которой жестко закреплен на опоре (рис.39.1). Когда волна достигает основания, происходит резкое изменение свойства упругой среды. В результате происходит возврат волнового импульса, т. е. импульс движется по этой самой веревке в противоположном направлении (рис.39.1).

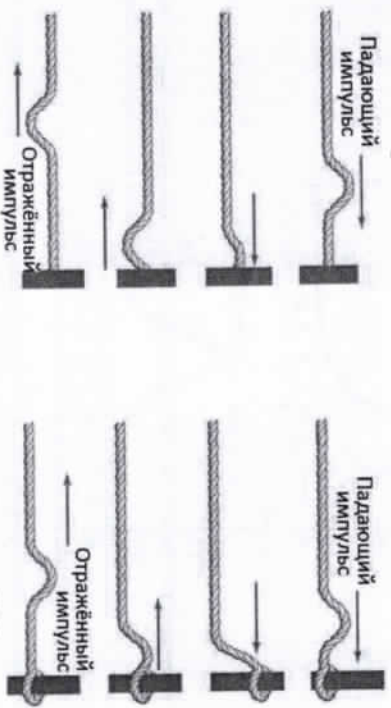


Рисунок 39.1

Рисунок 39.2

Следует обратить особое внимание на то, что возвратный волновой импульс находится в перевернутом состоянии (рис.39.1). Причина объясняется на основании 3-го закона Ньютона. Когда импульс достигает точки, в которой веревка прикреплена к опоре, веревка действует на опору с силой, направленной вверх. Точно так же опора по закону обратного действия действует на веревку в противоположном направлении с силой, направленной вниз. Именно эта сила и вызывает опрокидывание (отражение) импульса.

Теперь давайте посмотрим на ситуацию на рисунке 39.2. В этом случае конец веревки, прикрепленный к опоре, может свободно перемещаться вертикально вдоль опоры. Даже в этом случае импульс волны приходит к опоре и возвращается от нее. Но на этот раз ситуация будет иной. Когда импульс достигает опоры, веревочная оплетка не может воздействовать на опору с силой, но сама оплетка поднимается до плотности импульса, а затем возвращается. Импульс не опрокидывается (не отражается) из-за отсутствия отражающего воздействия на веревочный узел со стороны опоры, он возвращается назад, как и в первоначальном случае.

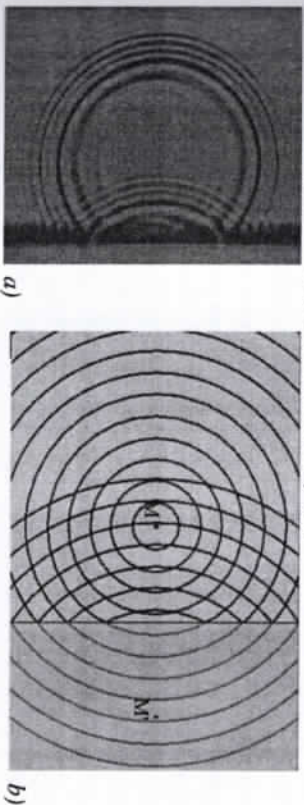


Рисунок 39.3

В волне, распространяющейся по поверхности воды, тоже будет, как на рисунке 39.1. Так как упругая среда – это волна, распространяющаяся в воде, – при ударе о твердый берег происходит резкое изменение упругих свойств среды, то возврат происходит в противоположную фазу.

На рисунке 39.3-а изображено возвращение от берега сферической волны, распространяющейся из точки *M*. При этом происходит такое же явление, как и при отражении света от плоского зеркала. Возвратная волна возвращается от берега, как бы распространяясь от источника мнимого *M'* (рис.39.3-б).

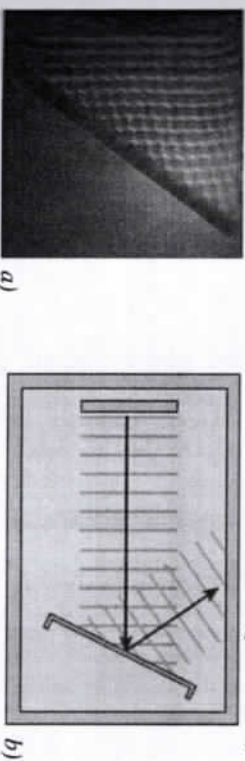


Рисунок 39.4

Волны, распространяющиеся по поверхности воды, также, как и световые волны, падают на берег под тем же углом, что и волны, возвращающиеся с берега под таким же углом. 39.4-а, где на рисунке приведена картина явления

возвращения воды из твердого тела в естественном состоянии, а на рисунке 39.4-б приведена экспериментальная схема этого явления. Итак, из рисунков видно, что угол падения равен углу отражения.

Жесткая граница или береговая линия не только отталкивает волну, распространяющуюся по поверхности воды, но и может изменить форму возвратной волны. Например, сферическая волна может быть преобразована в плоскую волну или, наоборот, плоская волна может быть преобразована в сферическую волну. Кроме того, волну можно сфокусировать – собрать, или распространить. На рисунке 39.5 приведены некоторые примеры из них, на рисунке 39.5 а показано, что плоская волна распространяется и рассеивается при возвращении от выпуклой границы, а на рисунке 39.5 в фокусируется и концентрируется в одной точке при возвращении от вогнутой границы.

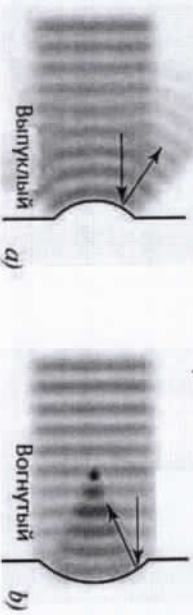


Рисунок 39.5

Из всех рассмотренных выше случаев можно сделать вывод, что отражения механической волны от границы плоского или сферического твердого тела можно сравнить с отражением световой волны от плоской или сферической поверхности. Таким образом, оказывается, что явление отражения является общим понятием для всех волн в природе.

### Переход механических волн в другую среду и преломление на границе перехода: вынуждающее волнение

Давайте посмотрим, какое явление происходит, когда механические волны перемещаются из одной среды в другую. Из этого можно сделать вывод, что поскольку упругость сред различна, скорость распространения и длина волны в этих средах также должны изменяться. Проверим это несколькими экспериментами.

Пусть бегущая волна движется от тонкой веревки к толстой веревке, как на рисунке 39.6-а. Когда волновой импульс достигает предела, на котором находится веревка, часть энергии волны переходит на второй веревки, а другая часть возвращается обратно. Прошедшая волна продолжает свое движение в правильном положении, а возвращающаяся возвращается в перевернутом положении (рис. 39.6-б). Причиной этого является третий закон Ньютона, как мы видим на рисунке 39.1. Следовательно, поскольку тонкая веревка переходит из среды с малой упругостью в среду с большой

упругостью, когда она достигает толстой веревки, толстая веревка оказывает противоположное направленное отражение на волновой импульс.

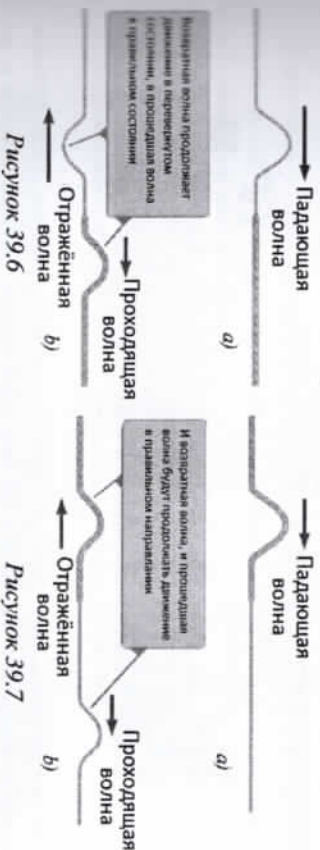


Рисунок 39.6

Рисунок 39.7

Теперь посмотрим на случай, противоположный рисунку 39.6, то есть пусть бегущая волна переходит от толстой к тонкому канату (рис. 39.7-а). При этом часть энергии волны, достигая предела, на котором держится канат, переходит на второй канат, а другая часть возвращается обратно. Но при этом возвратная волна, не опрокидываясь, прямолинейно возвращается назад (рис. 39.7-б). Потому что тонкая волна, упругость которой мала, когда импульс волны достигает предела, не может оказывать обратного эффекта. Результат возвращается в правильное положение точно так же, как на рисунке 39.2.

Теперь давайте рассмотрим на эти два случая, которые мы рассмотрели, как это происходит для волн на поверхности воды (рис. 39.8). В местах, где дно воды глубокое, эластичность среды хорошая, также можно понять, что условия для распространения волны и вибрационного колебания также хороши.

Потому логично, что в глубоких местах скорость распространения волны и длина волны будет больше. Области, где дно воды неглубокое, можно сравнить с средами, где волна более жесткая. Поэтому на неглубоких участках водоема волна, распространяющаяся и колеблющаяся так, как будто создается противоположные колебания. В результате можно сказать, что скорость распространения волны и длина волны на менее глубоких участках будет меньше. На рисунке 39.8 изображено укорочение длины волны при переходе плоской волны, распространяющейся по поверхности воды, из глубокого



Рисунок 39.8

места к менее глубокому месту. Поскольку частота колебаний никогда не меняется, мы можем сказать, что скорость распространения волны также замедляется при переходе менее глубокого места.

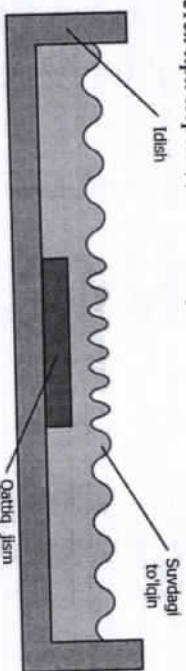


Рисунок 39.9

А на рисунке 39.9 представлена схема эксперимента, при котором явление сокращения длины волны при переходе от глубокого места к неглубокому может быть выполнено в простях домашних условиях. При этом создается стойкая волна путем встряхивания воды в резервуаре. Из-за того, что область воды, в которой находится твердое тело на дне сосуда, неглубокая, отсюда происходит сокращение длины волны и скорости распространения.

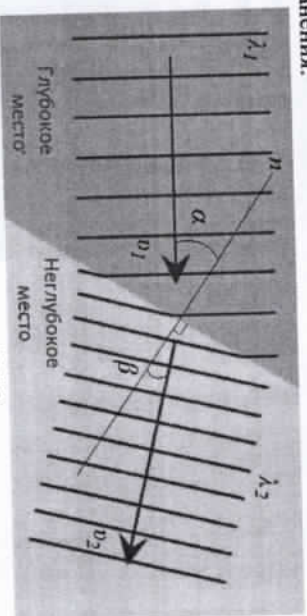


Рисунок 39.10

Выше мы ознакомились с тем, что происходит, когда волна на поверхности воды падает перпендикулярно на границе глубоких и неглубоких участков. Вполне естественно, что возникает вопрос о том, что происходит, когда одна и та же волна падает под углом к границе. Это условие изображено на рисунке 39.10, где описывается преломление волны к нормали, прошедшей в неглубокую среду. Это связано с уменьшением длины волны и уменьшением скорости при переходе в более мелкую область. От глубокой сферы к границе плоская волна падает под углом  $\alpha$ , а от мелкой сферы преломляется под углом  $\beta$ . Длины волн и скорости распространения волны в этих областях изображены соответственно на рисунке 39.10. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления называется показателем преломления волны относительно неглубокого места.

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

Это можно уподобить закону преломления света, знакомому нам еще со средней школы. Показатель преломления волны также может быть выражен через скорости и длины волн.

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

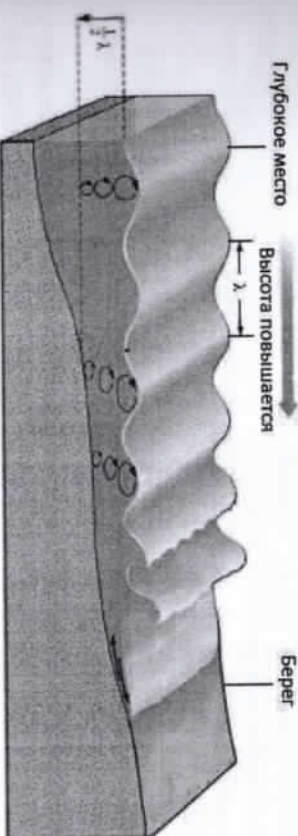


Рисунок 39.11

Мы много раз были свидетелями того, как волны падают на берег в море или озере, а затем возвращаются обратно. При этом море становится все более мелким по мере приближения к побережью изнутри, а также увеличивается сопротивление распространению волны, вращении и брызгам. Не существует резкой границы между глубокой и мелкой областью, как на рисунке 39.8 или 39.9, но она становится все более мелкой по мере приближения к берегу. Мы много раз были свидетелями того, как волны бьют по берегу моря или озера, а затем возвращаются обратно. При этом по мере приближения моря к побережью его глубина уменьшается, а также увеличивается и сопротивление распространению волны, колебательному раскатыванию. Не существует резкой границы между глубокой и менее глубокой областью, как на рисунке 39.8 или 39.9, но она становится все уменьшается по мере приближения к берегу. Следовательно, при этом длина волны в поперечном направлении уменьшается (рис.39.11). Кроме того, при приближении слишком близко к берегу форма волны меняется с синусоидальной на заостренную, волнистую. Так должно быть и по закону сохранения энергии. Обычно берега всех морей и озер образовывали определенные образования в результате тысячелетней естественной эрозии. По мере приближения моря к берегу мелководье становится другим, т. е. форма плоской волны, приближающейся к берегу издалика.

искривляется и принимает искривленную форму, так как рельеф береговой линии не ровный, а извилистый.

Другими словами, даже при неравномерности преломления волны возникают искривления, как на рисунке 39.12.

Другими словами, показатель преломления волны в местах, близких к берегу, одинаков, даже если он неоднороден, плоская волна, приближающаяся к берегу издалека, преломляется под разными углами. В результате образуются искривленные волны, как на рисунке 39.12.

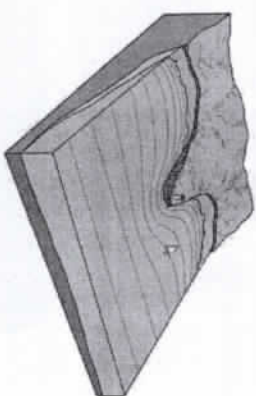


Рисунок 39.12

Таким образом, оказывается, что явление преломления волны также является общим, универсальным понятием для всех волн в природе.

**Принцип суперпозиции и явление интерференции для механических волн:**

С правилами сложения механических колебаний мы познакомились в § 38. Складываются ли как механические волны? Чтобы узнать это, давайте познакомимся с экспериментом на рисунке 39.13. На рис.39.13-а изображены движущиеся навстречу друг другу импульсы двух волн разной высоты – меньшей и большей.

Перед слиянием высота импульса увеличивается (рис.39.13-б), превращается в один высокий импульс (рис. 39.13-с), а при чередовании импульсов высота импульса начинает уменьшаться (рис. 39.13-д). Когда импульсы расходятся, каждый импульс продолжает свой путь, сохраняя свою высоту (рис.39.13-е), как будто они не встречались на пути. Когда импульсы расходятся, каждый импульс продолжает свой путь, сохраняя свою высоту (рис.39.13-е), как будто они не встречались на пути.

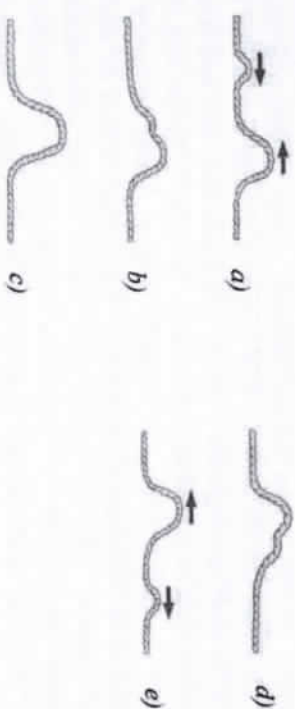


Рисунок 39.13

Если мы скажем, что две высоты импульса равны  $A_1$  и  $A_2$  соответственно, мы можем сказать, что общая высота импульса равна, когда эти импульсы полностью сливаются (рис.39.13-с).

$$A = A_1 + A_2$$

В общем случае необходимо решить задачу определения высоты импульсов волны на рисунке 39.13 в произвольный момент. Если дано уравнение каждой волны, бегущей по веревке,  $y_1 = y_1(x, t)$  и  $y_2 = y_2(x, t)$ , то уравнение волны, образующейся в результате слияния этих волн, в произвольный момент и в произвольную координату будет состоять из алгебраической суммы уравнений каждой волны.

$$y = y_1 + y_2 \quad \text{или} \quad y(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) \quad (39.1)$$

Приведенное выше уравнение называется принципом суперпозиции волн.

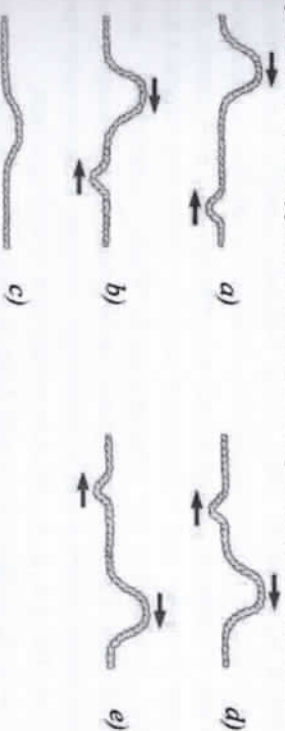


Рисунок 39.14

Теперь рассмотрим случай, когда один из волновых импульсов является обратным, то есть перевернутым (рис.39.14). На рис. 39.14,а изображены два направленных навстречу друг другу волновых импульса разной высоты. При этом один из них, более крупный, находится в правильном положении, а другой, меньший, в перевернутом положении, приближаясь друг к другу (рис.39.14-а). Еще до слияния между собой сохраняются высоты импульсов (рис.39.14-б), которые при слиянии превращаются в один импульс меньшей высоты (рис. 39.14-с), а при обмене импульсами вновь начинают расходиться импульсы предыдущей высоты (рис. 39.14-д). Когда импульсы расходятся, каждый импульс продолжает свой путь, сохраняя свою высоту, а также свое правильное и обратное положение (рис.39.14-е), как будто они не встречались на пути. Если мы скажем, что две высоты импульса равны  $A_1$  и  $A_2$  соответственно, мы можем сказать, что общая высота импульса равна, когда эти импульсы полностью сходятся (рис.39.14-в).

$$A = A_1 - A_2$$

В общем случае необходимо решить задачу определения высоты импульсов волны на рисунке 39.14 в произвольный момент  $y_1 = y_1(x, t)$  и  $y_2 = y_2(x, t)$ . Если дано уравнение каждой волны, бегущей по канату, и, то уравнение волны, образованной слиянием этих волн в произвольный момент и в произвольную координату, будет алгебраически вычитанием уравнения каждой волны.

$$y = y_1 - y_2 \quad \text{или} \quad y(x, t) = y_1(x, t) - y_2(x, t) \quad (39.2)$$

Приведенное выше уравнение называется принципом суперпозиции волн.

Теперь в какой-то момент мы познакомимся с условиями для образования непрерывной заряженной громкой волны или тихой волны для произвольной оси времени.

Если частота колебаний двух волн одинакова, а разность фаз колебаний не изменяется во времени, такие волны называют взаимно-когерентными. Источники, генерирующие такие волны, называются взаимно-когерентными источниками. Например, перекрестный когерентный источник может быть создан путем бросания двух одинаковых камней с одинаковой высоты в воду. Волны, исходящие от взаимно-когерентных источников, могут наблюдаться при увеличении волны (возбуждении, возмущении) или ослаблении волны (затухании) в результате слияния в какой-либо точке пространства. Такое явление называется волновой интерференцией.

Если волны складываются в одной фазе, то волны усиливаются (повторяют) друг друга, при этом соблюдается условие максимумов. Если волны складываются в противоположную фазу, то волны ослабляются (затихают) друг друга, при этом соблюдается условие минимумов. Другими словами, там, где впадины волн сливаются, нарастает возмущение, а там, где впадины одной волны встречаются с впадинами второй волны, возмущение наиболее слабое, наблюдается затихие.

Первый из взаимно сходящихся источников равен  $M_1$ , а второй —  $M_2$ , и пусть точка, в которой эти волны встречаются, равна  $N$ . Каждая первая из взаимно сходящихся точек равна  $M_1$ , а вторая —  $M_2$ , и пустая точка, в которой эти точки встречаются, равна  $N$ .

Пусть путь, пройденный каждой волной, пока они не встретятся  $\ell_1 = M_1N$  и  $\ell_2 = M_2N$ , это разница между путями, которые проходит, пока волны не встретятся  $\Delta\ell = \ell_2 - \ell_1 = M_2N - M_1N$  (рис. 39.15-а, б).

Если вторая волна приходит с запаздыванием от первой волны до четного числа (или целого числа) длин волн, эти волны складываются в одну фазу ( $\Delta\varphi = 0$ ), в точке слияния происходит их возбуждение, усиливая друг друга. В

точке  $N$  выполняется условие максимума, результирующая амплитуда будет  $A = A_1 + A_2$ . Условие максимумов будет следующим:

$$\Delta\ell = 2k \cdot \frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad (39.3)$$

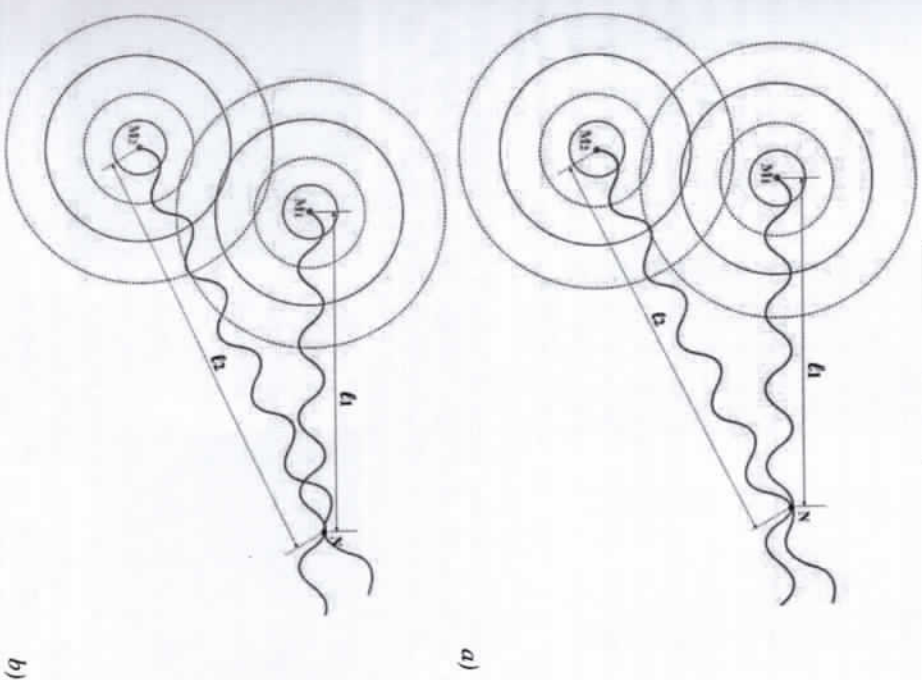


Рисунок 39.15

Если вторая волна приходит с задержкой от первой волны до нечетного числа полуволн, эти волны складываются в противоположную фазу ( $\Delta\varphi = \pi$ ), в точке слияния происходит затухание, когда они ослабляют друг друга. В точке  $N$  выполняется условие минимума, результирующая амплитуда  $A = |A_1 - A_2|$ . Минимальное условие будет следующим:

$$A^2 = (2k-1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

(39.4)

Схематическое изображение интерференционной картины, образованной двумя точечными источниками на поверхности воды, показано на рисунке 39.15, а естественное — на рисунке 39.16.

Естественно, что возникает вопрос о том, выполняется ли закон сохранения энергии, когда волны присоединяются и интерферируют. Так как при выполнении условия максимума амплитуда колебаний увеличивается, то и механическая энергия увеличивается, а при выполнении условия минимума колебания вообще не наблюдаются, то механическая энергия становится равной нулю. Кажется так, при выполнении условия максимума энергия уходит из небытия, а при выполнении условия минимума энергия исчезает из небытия. Но это не так. Механическая энергия переносится из точки, в которой выполнено условие минимума, в точку, в которой выполнено условие максимума, т. е. происходит перераспределение энергии в пространстве. И в этом, как и во всех природных явлениях, полностью соблюдается закон сохранения энергии.

Если когерентные волны, достигая точки  $N$ , не складываются ни в одной фазе, ни в противоположной фазе, иными словами, разность фаз имеет промежуточные значения ( $0 < \Delta\varphi < \pi$ ), естественно возникает вопрос, как будет выглядеть интерференционная картина.

При этом интерференционная картина находится в интервале между спокойствием и полным возбуждением, то есть амплитуда колебаний находится в интервале  $|A_1 - A_2| < A < A_1 + A_2$ . Также естественно, что если волны не являются взаимно когерентными, то возникает вопрос о том, как будет выглядеть интерференционная картина.

При этом, поскольку разность фаз колебаний изменяется во времени, интерференционная картина в наблюдаемой точке также изменяется во времени. В наблюдаемой точке соблюдается иногда условие максимума, иногда промежуточные значения и иногда условие минимума.

#### Дифракция волн:

Волна встречает на своем пути большие или маленькие препятствия и щели. При этом волна имеет свойство отклоняться от своего первоначального направления.

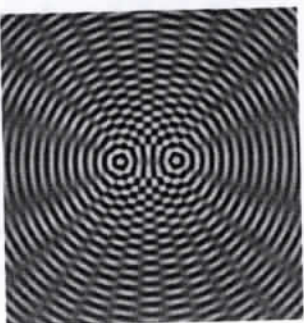


Рисунок 39.16

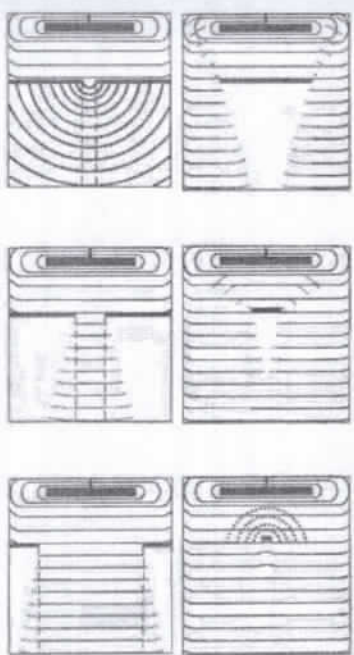


Рисунок 39.17

С явлением дифракции мы сталкивались очень часто в жизни. Например, морские волны беспрепятственно проходят через выступающую из воды скалу и, вращаясь, продолжают распространяться, как будто ничего не произошло. Точно так же волна, вызванная камнем, брошенным в бассейн волна также может свободно двигаться по выступающей из воды скале.

В отклонении волны от ее первоначального направления большое значение имеют размеры препятствия и щели. Если размеры препятствия и щели достаточно велики по длине волны, геометрическая тень от первоначального направления волны продолжает распространяться в своем первоначальном направлении с небольшим отклонением от сферы. При этом вид за экраном вообще не меняется. Лишь незначительное искривление наблюдается на краях волн (рис.39.17). А очень мелкие щели становятся вторичным источником (рис.39.17).

Схематическое изображение дисперсионной картины, образующейся из небольшой щели на поверхности воды, представлено на рисунке 39.17, а естественное — на рисунке 39.18.



Рисунок 39.18

#### Вопросы по теме:

1. Что называют интерференцией механических волн?
2. Что называют взаимно-когерентными волнами?
3. Запишите условие максимума. Какое событие происходит в этом?

4. Напишите условие минимума. Какое событие происходит в этом?
5. Как изменяется разность фаз колебаний и путей, если одна из встречающихся волн возвращается с поверхностью?
6. Что такое явление дифракции в механических волнах?
7. Какие условия должны быть выполнены, чтобы наблюдалась явление дифракции?

**Решение задачи:**

1. Есть два источника, которые колеблются в одной фазе и создают плоскую волну с одинаковой частотой и амплитудой в окружающей среде ( $A_1 = A_2 = 1 \text{ см}$ ). Найдите амплитуду колебаний точки среды, находящейся на расстоянии  $\ell_1 = 3,5 \text{ м}$  от первого источника и  $\ell_2 = 5,4 \text{ м}$  от второго источника. Направление колебаний в рассматриваемой точке совпадает. Длина волны  $\lambda = 0,5 \text{ м}$ .

**Дано:**

$A_1 = A_2 = 1 \text{ см}$	<b>Решение</b>	Запишем волновое уравнение для волн,
$\varphi_{0,1} = \varphi_{0,2} = 0$		распространяющихся от обоих источников.
$\ell_1 = 3,5 \text{ м}$		$y_1(x, t) = A_1 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - y_1) + \varphi_{0,1}\right) = A_1 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - y_1)\right)$
$\ell_2 = 5,4 \text{ м}$		$y_2(x, t) = A_2 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - y_2) + \varphi_{0,2}\right) = A_2 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - y_2)\right)$
$\lambda = 0,5 \text{ м}$		
$A = ?$		

Поскольку в условии задачи запрашивается только результирующая амплитуда, мы отбрасываем зависимость от времени часть волнового уравнения.

$$y_1(x) = A_1 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right), \quad y_2(x) = A_2 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)$$

Вместо переменной  $x$  в уравнении ставим расстояния от наблюдаемой точки до источников и прорешаем задачу по принципу суперпозиции.

$$y(x) = y_1(x) + y_2(x) = A_1 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) + A_2 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)$$

$$A = A_1 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}\ell_1\right) + A_2 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}\ell_2\right) = A_1 \sin\left(\frac{2\pi}{0,5 \text{ м}} \cdot 3,5 \text{ м}\right) + A_2 \sin\left(\frac{2\pi}{0,5 \text{ м}} \cdot 5,4 \text{ м}\right) = A_1 \sin(14\pi) + A_2 \sin(20,8\pi) = 1,73 \text{ см}$$

**Ответ:**  $A = 1,73 \text{ см}$ .



**§ 40. ЭЛЕМЕНТЫ АКУСТИКИ. ЗВУКОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ**

Вселенная полна разнообразных звуков, таких как жужжание часов и к ним относятся и птичьи стаи, и человеческие голоса, и так далее. Что такое звук и как он возникает? Среди них есть и другие. Что такое звук и как он возникает? Об этом люди начали задумываться с незапамятных времен.

Например, они заметили, что звуки исходят от дрожавших тел в воздухе. Древнегреческий философ и ученый-энциклопедист Аристотель, основываясь на наблюдениях, правильно объяснил природу звука: он полагают, что издаваемое звуком тело вызывает сжатие и разрежение разреженного воздуха. Например, колеблющаяся струя воздуха то уплотняет, то разрежает воздух, а за счет упругости воздуха эти последовательные воздействия передаются в пространстве от слоя к слою, возникают упругие волны. Добравшись до наших ушей, они воздействуют на подвеску, вызывая ощущение звука.

Раздел физики, в котором изучаются звуковые явления, называется акустикой.

**Образование звуковых волн:**

Звуком называют продольные механические волны, вызывающие колебание оциллирующие в слуховом органе человека.

В воздухе звуковые волны распространяются в виде упругой продольной волны, при которой слой воздуха либо уплотняется, либо разрежается, т. е. происходит периодическое колебание давления воздуха (рис. 40.1). Так как направление колебаний частиц воздуха-это направление распространения звука, то и звуковые волны-это продольные волны. Расстояние между двумя соседними плотными слоями или между двумя соседними разреженными слоями-это длина звуковой волны.

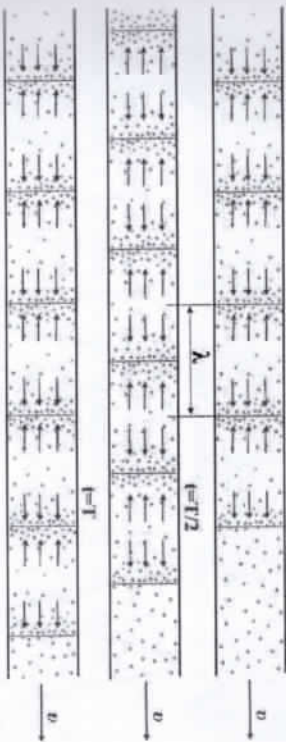


Рисунок 40.1

Теперь давайте подумаем о том, как генерируется звуковая волна. Магнитомагнитная звуковая волна создается с помощью специального инструмента – камертона, который вибрирует с точно такой же частотой

(рис.40.2). Камертоны в основном состоят из двух частей, состоящих из U-образного металлического рога, прикрепленного к длинному прямому металлическому стержню. Камертоны представляют собой специальный молот, при помощи которого металлический Рог U-образного сечения вибрирует с той же частотой, что и при ударе о деталь, при этом частота колебаний фиксируется в паспорте камертонов (рис.40.2-а).

Кончик камертона при колебании ударно вибрирует прилегающие к нему молекулы воздуха. В результате этого удара молекулы воздуха сжимаются под действием дополнительного давления. Когда рог камертона возвращается назад, молекулы воздуха разрежаются и давление немного уменьшается. Последовательные сжатия и разрежения молекул воздуха распространяются в пространстве, когда вибрация рога камертона продолжается. В результате образуется продольная звуковая волна (рис.40.2-б).

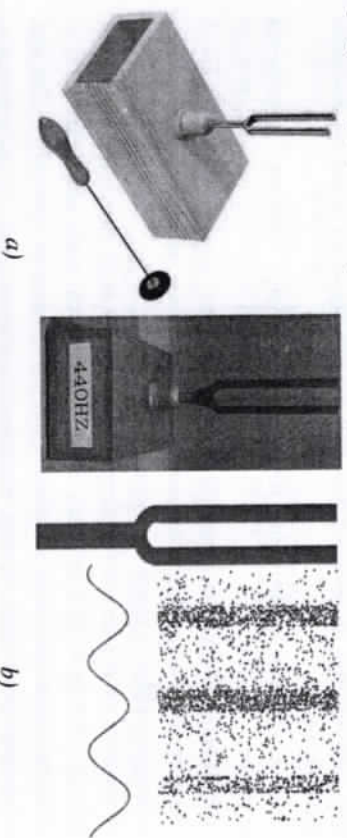


Рисунок 40.2

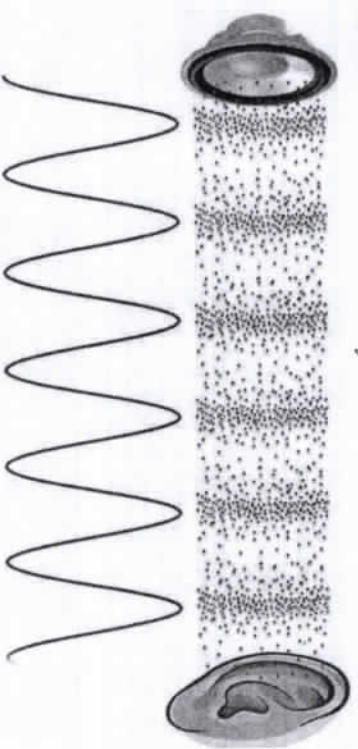


Рисунок 40.3

На рисунке 40.3 изображено колебание молекул воздуха вибрацией динамика — образование звуковой волны. Место максимальной скопления молекул воздуха, то есть область наибольшей плотности, можно назвать

максимумом волны и уплотнить выпуклости волны, распространяющейся по поверхности воды. Напротив, область, в которой молекулы воздуха минимально сосредоточены, то есть наиболее разреженная область, можно назвать волновым минимумом и сравнить с областью глубины волны, распространяющейся по поверхности воды (рис.40.3).

Мы хорошо знаем, что амплитуда волны, бегущей по канату, или амплитуда волн, распространяющихся по поверхности воды, — это расстояние до крайнего отклонения в равновесии или, другими словами, половина расстояния между выпуклостью и глубиной. Но под амплитудой звуковой волны мы можем понимать амплитуду колебаний камертона или динамика. Но есть и такое понятие, как давление, под которым понимается амплитуда звуковых волн. Давление в уплотненной области лишь немного (около  $10^{-20}$  Па) выше нормального атмосферного давления, в то время как давление в разреженной области лишь немного (около  $10^{-20}$  Па) меньше нормального атмосферного давления (рис.40.4). Мы бы увеличили количество этого дополнительного давления, когда мы повышаем громкость радио или телевизора. Другими словами, при увеличении звука расстояние (длина волны) между соседними плотными слоями или между соседними разреженными слоями не изменяется, сильнее проявляются только уплотнение и разрежение. При этом атмосферное давление периодически колеблется (рис.40.4).

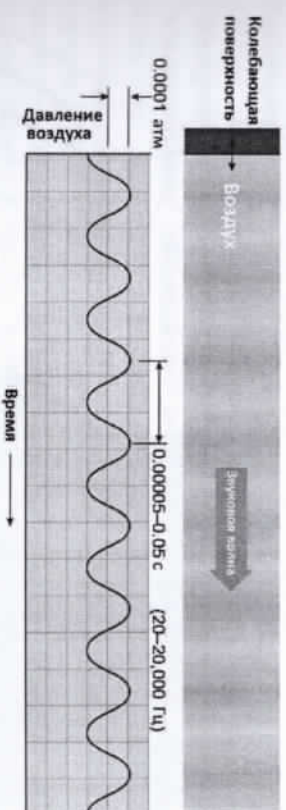


Рисунок 40.4

Следует отметить, что звук слышен только в том случае, если между источником звука и органом слуха существует упругая среда, способная распространять звуковые волны. Распространение звуковой волны в упругой среде можно доказать с помощью электрического колокола, помещенного под стеклянную крышку воздушного насоса. По мере того, как давление воздуха под стеклянной крышкой уменьшается, то есть воздух становится все более редким, слышимость звука также уменьшается, и, наконец, он становится неслышимым, когда создается вакуум. Из проверки выяснилось,



что только продольные механические волны с частотами колебаний от 20 Гц до 20 000 Гц вызывают звуковое ощущение в органе слуха человека. Этот частотный диапазон называется диапазоном слышимости (рис. 40.5).



Таким образом, человек слышит звук только при выполнении следующих пяти условий:

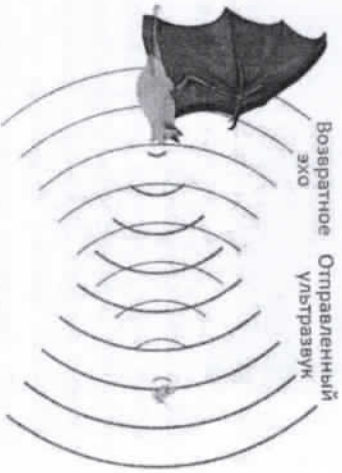
- 1) наличие источника звука;
- 2) Наличие упругой среды между источником звука и органом слуха;
- 3) частота колебаний источника звука лежит в пределах 20 – 20 000 Гц;
- 4) мощность звуковых волн достаточна для формирования звукового ощущения в органе слуха;
- 5) орган слуха (ухо) должен быть здоровым.

**Ультразвук и инфразвук:**

Механические колебания с частотами колебаний более 20 000 Гц не воспринимаются человеческим ухом как звук. Их называют ультразвуковыми колебаниями или ультразвуковыми волнами. Верхние пределы частот ультразвука условно принято считать  $10^8$  Гц. Для генерации и приема ультразвука используются устройства, называемые ультразвуковыми излучателями и приемниками.

**Зависимость скорости распространения и поглощения ультразвуковых волн от состояния среды** используется при изучении молекулярных свойств веществ. Эти исследования изучаются в области, называемой молекулярной акустикой.

При изучении глубин водоемов, рельефа их дна, айсбергов, скопления рыб, подводных лодок и т. п. по принципу, основанному на свойствах отражения



ультразвуковых волн от границы двух сред, применяют гидролокаторы, называемые эхолотами.

Дельфины и радулжницы имеют очень совершенствованные частные ультразвуковые локаторы. Частота импульса радулжных ультразвуковых колебаний 25 000 – 30 000 Гц, а продолжительность 0,015 с. На рисунке 40.6 показано, как оса охотится на кузнечика или бабочку. Сигналы, посылаемый радулой, определяет, на каком расстоянии находится предмет, в зависимости от времени возврата Эха, возвращающегося от объекта в направлении движения (Время прибытия ультразвука прямо пропорционально расстоянию до предмета). Кроме того, он получает информацию о размере (большом или малом) предмета, а также о его спокойном состоянии или движении (рис. 40.5).

С помощью ультразвуковых дефектоскопов можно обнаружить дефекты металлических изделий, трещины, определить истинные линейные размеры тел. Ультразвук оказывает биологическое и физиологическое воздействие. Например, некоторые виды растений (хлопок, горох, картофель и т. д.) при ультразвуковом воздействии на их семена они быстро прорастают и их урожайность увеличивается. Под воздействием этого звука молоко быстро не заквашивается, эритроциты растворяются, горбуша и мелкая рыбаешка погибают в течение минуты. С помощью ультразвука погибают микроорганизмы и бактерии, что позволяет использовать их при стерилизации.

Ультразвук широко используется в медицине. Плод матери можно увидеть на экране с помощью ультразвука, этот метод гораздо более безвреден, чем рентгеноскопия. Помимо внутренних органов человека, например, печени, почек, предстательной железы, простату можно определить с помощью УЗИ (рис. 40.7).



Во время операции ультразвуковое разрезание мягких тканей и трансплантация поврежденных костных тканей.

Механические волны с частотой колебаний менее 20 Гц называются инфразвуковыми волнами или инфразвуком. Они не вызывают у человека ощущения звука. Инфракрасные волны образуются во время ураганов и

землетрясений, в море и на земной коре. Скорость распространения ряби будет намного больше скорости распространения гигантской волны, которая будет во время урагана или землетрясения. Это дает возможность некоторым животным, способным улавливать волны хомеровуха, воспринимать сигналы о приближающейся опасности. Диапазон частот и длин волн всех звуковых волн приведен в таблице 40.1. При этом скорость распространения звука в воздухе принимается равной 340 м/с.

Таблица 40.1

	Слышимый звук	Ультразвук
$\nu$ , Гц	20 – 20 000	Больше чем 20 000 Гц
$\lambda$ , м	17 – 0,017	Меньше чем 0,017 м

**Скорость распространения звука:**

Звуковые волны распространяются в веществе с ограниченной скоростью, как и все остальные волны. Скорость его распространения определяется из формулы пути прямолинейного прямолинейного движения.

$$g = \frac{s}{l}$$

Рассмотрим способ определения скорости распространения звука. Свет распространяется с огромной скоростью света  $c = 300\,000$  км/с. Поэтому при выстреле из винтовки сначала видны огонь и дым, а через некоторое время слышен звук. Таким образом, поскольку мощность светового сигнала очень мала, мы не можем игнорировать ее.

При определении скорости звука в воздухе один из двух человек стоящих на некотором расстоянии (5-10 км) друг от друга, запускает мышцу вверх из пистолета, а другой, увидев мышечную вспышку, запускает секундомер и, услышав звук, останавливает его. При этом, зная расстояние  $s$  и время прибытия звука  $t$ , определяется скорость звука в воздухе.

Получается скорость распространения звука  $g_0 = 332$  м/с в сухом воздухе при температуре  $\theta^\circ\text{C}$ . Установлено, что при комнатной температуре и средней влажности это скорость звука  $g = 340$  м/с.

Скорость распространения звука в газах пропорциональна квадратному корню из абсолютной температуры без зависимости от плотности газа, а молярная масса газа обратно пропорциональна квадратному корню из. Например, установлено, что скорость распространения звука при температуре  $\theta^\circ\text{C}$  равна 315 м/с в кислороде, 1263 м/с в водороде и 258 м/с в углекислом газе. Для скорости распространения звука в газах можно использовать следующую формулу.

$$g = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (40.1)$$

Здесь:  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  — является коэффициентом Пуассона для одноатомных

газов  $\gamma = \frac{5}{3}$ , для двухатомных газов  $\gamma = \frac{7}{5}$  а для трех (многоатомных) газов  $\gamma = \frac{4}{3}$  принято.

Скорость распространения звука зависит от агрегатного состояния вещества. Например, звук распространяется в воде со скоростью 1480 м/с, в стекле со скоростью 5600 м/с, а в стали со скоростью 5000 м/с.

Скорость распространения звука в металлах находится по формуле:

$$g = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (40.2)$$

Здесь:  $E$  — модуль упругости при продольной деформации (или модуль Юнга);  $\rho$  — плотность металла.

**Интенсивность и жесткость звука:**

Величина, количественно равная звуковой энергии, проходящей через единицу поверхности, перпендикулярную направлению распространения звука, за единицу времени, называется интенсивностью звука. Другими словами, интенсивность звука — это величина, равная силе звука, проходящего через единицу поверхности, перпендикулярной направлению звука.

$$I = \frac{W}{St} = \frac{N}{S} \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right] \quad (40.3)$$

Интенсивностью звука, который слышен в ухе (шорох дерева издали), называется звуком, имеющий интенсивность на слуховом пороге  $(I_0 = 10^{-11} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2})$ .

Интенсивностью звука, вызывающего боль в ухе (шум реактивного самолета), называется звук, имеющий интенсивность на слуховом пороге  $(I_0 = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2})$ .

Интенсивность звука объективно характеризует физический процесс независимо от того, воспринимается звук слушателем или нет. Но есть такая величина, которая носит субъективный характер, это твердость звука. Причина, по которой говорят, что твердость звука носит субъективный характер, заключается в том, что эта величина вводится исходя из физиологических особенностей органа слуха. Для кого-то один звук кажется громче, для кого-то другой может показаться мягче. При выборе шкалы

твердости учитываем логарифмический закон и условляем, что твердость на слуховом пределе равна нулю (хотя интенсивность отличается от нуля). Если интенсивность звука  $I=I_0$ , то жесткость этого звука равна  $L=0$  Б (белл). Если интенсивность звука  $I=10I_0$ , то жесткость этого звука равна  $L=1$  Б. Если интенсивность звука  $I=100I_0$ , это означает, что жесткость звука  $L=2$  Б. Если интенсивность звука  $I=I_{max}=10^{13}I_0$ , это означает, что жесткость звука  $L=13$  Б.

Уровень шума находится по формуле:

$$L = 10 \lg \left( \frac{I}{I_0} \right) \text{ [Б]} \quad (40.4)$$

Уровень шума выражается в децибелах:

$$L = 10 \lg \left( \frac{I}{I_0} \right) \text{ [дБ]} \quad (40.4а)$$

Шумоподавление двух медленно разговаривающих людей составляет 40 дБ, шумоподавление рынка-80 дБ, шумоподавление двигателя грузовика-90 дБ, шумоподавление двигателя реактивного самолета-130 дБ и выше.

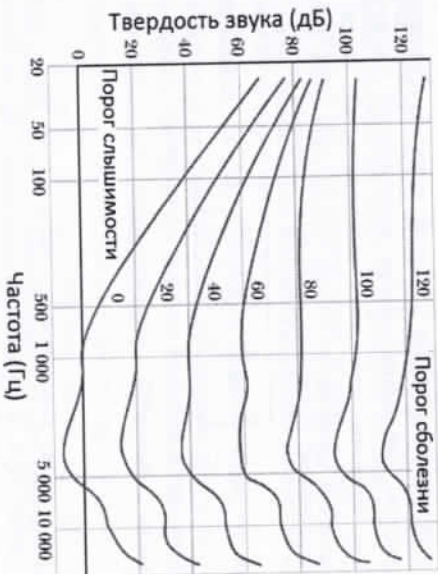


Рисунок 40.8

Порог слышимости звука и порог возникновения боли в ухе не одинаковы для всех частот, которые может слышать человеческое ухо. Другими словами, при изменении частоты изменяется интенсивность звука, который слышит барабанная перепонка или который вызывает боль в ухе. Эта область четко изображено на рисунке 40.8, который изображает кривые с минимальной точкой для порога слышимости и порога генерации боли. Также из графиков видно, что при значенных частоты 1000 -3000 Гц чувствительность уха будет самой высокой, то есть ухо сможет слышать звук

с наименьшей интенсивностью. Естественно, что возникает вопрос о том, как определяется жесткость шума, создаваемого несколькими источниками звука. При этом результирующая жесткость определяется по закону сохранения энергии. Другими словами, интенсивности звуков, исходящих от источников, складываются алгебраически, в то время как жесткости, в свою очередь, складываются на основе логарифмического правила. Жесткость  $L_1, L_2, L_3, \dots, L_N$ . Жесткость результирующего шума, возникающего в результате сложения шумов источников звука, присутствующих и сосредоточенных в одном месте, будет следующей:

$$L = 10 \lg (10^{L_1} + 10^{L_2} + 10^{L_3} + \dots + 10^{L_N}) \quad (40.5)$$

или

$$L = 10 \cdot \lg (e^{L_1/10} + e^{L_2/10} + \dots + e^{L_N/10}) \quad (40.5а)$$

**Доказательство:** Жесткости  $L_1 = 10 \lg \left( \frac{I_1}{I_0} \right), L_2 = 10 \lg \left( \frac{I_2}{I_0} \right), L_3 = 10 \lg \left( \frac{I_3}{I_0} \right), \dots, L_N = 10 \lg \left( \frac{I_N}{I_0} \right)$  соответственно, интенсивности звуков, которые равна:

$I_1 = I_0 \cdot 10^{L_1/10}, I_2 = I_0 \cdot 10^{L_2/10}, I_3 = I_0 \cdot 10^{L_3/10}, \dots, I_N = I_0 \cdot 10^{L_N/10}$ . Поскольку энергия является скалярной величиной, результирующая интенсивность равна:

$I_{res} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N = I_0 \cdot (10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_N/10})$

регулирующая жесткость равна:  $L_{res} = 10 \lg \left( \frac{I_{res}}{I_0} \right) = 10 \lg (10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_N/10})$

Результирующая жесткость, образующаяся в результате сложения шумов источников звука, каждый из которых имеет твердость  $L$  и сосредоточен в одном месте, выглядит следующим образом:

$$L = 10 \lg N + L \text{ [Б]} \quad \text{или} \quad L = 10 \cdot (\lg N + L) \text{ [дБ]} \quad (40.6)$$

**Интерференционные и дифракционные явления в звуковых волнах:**

Явление интерференции присуще всем волнам в природе, в том числе и звуковым волнам.

Для выполнения условия максимумов в звуковых волнах взаимно-когерентные звуковые волны должны быть сложены в одной фазе, то есть для плотных слоев или два разреженных слоя должны встретиться. Именно тогда в точке встречи наблюдается (шум) интерференция (рис.40.9-а). В точках, где выполняется условие максимумов, звук становится интенсивнее и звучит громче, чем обычно.

Для того чтобы в звуковых волнах было выполнено условие минимумов, взаимно согласованные звуковые волны должны складываться в противоположную фазу, т. е. встретиться плотный и разреженный слой.

Именно тогда в точке встречи наблюдается тишина (рис. 40.9-б). В точках, где выполняется условие минимумов, интенсивность звука низкая и слышна очень слабо или вообще не слышна. Явление дифракции также характерно для всех волн в природе, в том числе и для звуковых волн. Обычно мы принимаем колебания в диапазоне как звук  $\lambda = 17 \text{ мм} - 17 \text{ м}$ .

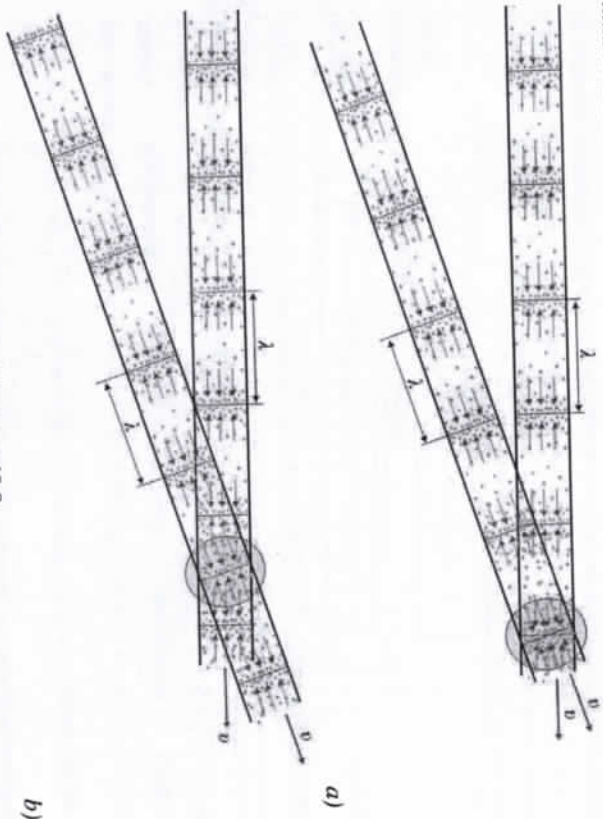


Рисунок 40.9

Отклонение звука в геометрическом направлении наблюдается, когда звуковая волна сталкивается с препятствиями и шельмами сопоставимого размера (немного больше или равно или немного меньше длины волны) с этими длинами волн. Каждый из нас сталкивался с этим явлением достаточно часто. Например, когда он кричит на человека за высокой стеной, он слышит звук, когда он не выдохнет, речь человека, находящегося в коридоре, будет слышна всей области, находящейся с геометрической стороны, звук трубы-трубы на свадьбе может быть слышен даже с места, где свадьба не видна, и т. д.

Вопросы по теме:

1. Что называется звуком? В каком диапазоне находится частота и длина волны звука?
2. Поговорим о том, как звучат ультразвук и инфразвук. В каком диапазоне находятся их частота и длина волны?
3. Запишите формулы для определения скорости распространения звука в газах и твердых телах.

4. Какое явление происходит, когда звуковые волны проникают в интерференцию?
5. Что такое дифракция в звуковых волнах? Какое условие должно быть выполнено для дифракции?
6. Что такое интенсивность звука? Запишите его формулу.
7. Что такое твердость звука? Что такое единица измерения твердости? Расскажите о порогах развития слуха и болевых ощущениях.

**Решение задач:**

1. Звуковая волна  $\nu = 1000 \text{ Гц}$  значения интенсивности для частоты на звуковом пороге  $I_0 = 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  К, на пороге образования боли в ухе  $I_{\text{max}} = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  если она равна, то с какой амплитудой колеблются молекулы воздуха? Плотность воздуха  $\rho = 1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , скорость звука  $\nu = 330 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Дано	Решение
$\nu = 1000 \text{ Гц}$	Формула энергии волны $E = \frac{m_0 g^2}{2} = \frac{\rho V (\omega A)^2}{2} = \frac{1}{2} \rho V \omega^2 A^2$
$I_0 = 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	Формула интенсивности
$I_{\text{max}} = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$I = \frac{E}{S t} = \frac{E}{V} = \frac{1}{2} \rho V \omega^2 A^2 \cdot \frac{g}{V} = \frac{1}{2} \rho g \omega^2 A^2$
$\rho = 1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	формируем формулу амплитуды.
$\nu = 330 \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$A = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I}{\rho g}} = \frac{1}{2\pi\nu} \sqrt{\frac{2I}{\rho g}}$
$A = ?$	Теперь выполним расчет для каждого случая.

$$A_1 = \frac{1}{2\pi\nu} \sqrt{\frac{2I_0}{\rho g}} = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \text{ Гц}} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}}{1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 330 \frac{\text{м}}{\text{с}}}} = 1,09 \cdot 10^{-11} \text{ м}$$

$$A_2 = \frac{1}{2\pi\nu} \sqrt{\frac{2I_{\text{max}}}{\rho g}} = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \text{ Гц}} \sqrt{\frac{2 \cdot 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}}{1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 330 \frac{\text{м}}{\text{с}}}} = 3,45 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

Ответ:  $A_1 = 1,09 \cdot 10^{-11} \text{ м}$ ;  $A_2 = 3,45 \cdot 10^{-5} \text{ м}$

2. Два одинаковых станка (станка) расположены на одинаковом расстоянии от рабочего. От каждого из станков в точку, где находится рабочий, поступает звуковая энергия одинаковой интенсивности

$I_1 = I_2 = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ . С какой жесткостью под шумом работает рабочий, если работает один станок? А, если оба станка работают? Признать порог слышимости  $I_0 = 10^{-13} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

**Дано**

$$I_1 = I_2 = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

**Решение**  
Формула для определения жесткости звука используем

$$I_0 = 10^{-13} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \qquad L = 10 \lg \left( \frac{I}{I_0} \right)$$

$L = ?$

Когда работает одна машина, только одна машина генерирует энергию шума для рабочего. Жесткость в этом равна:

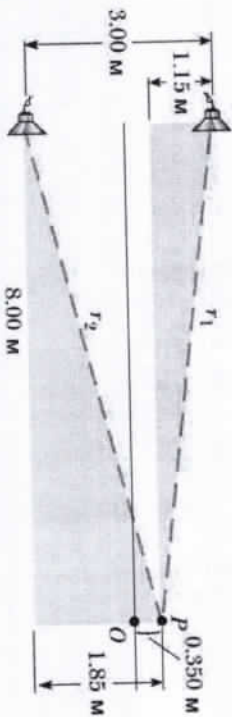
$$L_1 = 10 \lg \left( \frac{I}{I_0} \right) = 10 \lg \left( \frac{2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}}{10^{-13} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}} \right) = 10 \lg (2 \cdot 10^6) = 60 + 10 \cdot \lg 2 = 63 \text{ дБ}$$

При работе двух машин звуковая энергия каждой машины поступает к работнику. Следовательно, жесткость в этом равна:

$$L_{\text{общ}} = 10 \lg \left( \frac{I_1 + I_2}{I_0} \right) = 10 \lg \left( \frac{4 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}}{10^{-13} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}} \right) = 10 \lg (2 \cdot 10^6) = 60 + 10 \cdot \lg 2 = 66 \text{ дБ}$$

Ответ:  $L_1 = 63 \text{ дБ}$ ;  $L_2 = 66 \text{ дБ}$

3. Два звуковых колонки, находящихся на расстоянии 3 м друг от друга, колеблются одинаково. На расстоянии 8 м от центра линии, соединяющей громкоговорители, в точке О стоит слушатель. Затем слушатель начал двигаться к точке Р, которая находилась на расстоянии 0,35 м от точки О (см. рисунок). При достижении точки Р звук прекратился из-за первого минимума. С какой частотой колеблются колонки? Скорость звука 343 м/с.



**Решение:**

Находим расстояния  $r_1$  и  $r_2$  от точки Р до колонок.

$$r_1 = \sqrt{(8 \text{ м})^2 + (1,15 \text{ м})^2} = 8,08 \text{ м}$$

$$r_2 = \sqrt{(8 \text{ м})^2 + (1,85 \text{ м})^2} = 8,21 \text{ м}$$

$$\Delta r = r_2 - r_1 = 8,21 \text{ м} - 8,08 \text{ м} = 0,13 \text{ м}$$

Найдем разниц в пути.

Так как в точке Р выполняется условие начального минимума ( $n=0$ ), то с помощью условия минимума определяем длину звуковых волн, издаваемых колонками.

$$\Delta r = (2n + 1) \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2}, \rightarrow \lambda = 2\Delta r = 0,26 \text{ м}$$

Теперь определим частоту звуковой волны (т. е. колебание колонок).

$$\nu = \lambda \nu, \rightarrow \nu = \frac{\nu}{\lambda} = \frac{343 \text{ м/с}}{0,26 \text{ м}} = 1300 \text{ Гц} = 1,3 \text{ кГц}$$

Ответ:  $\nu = 1,3 \text{ кГц}$

#### § 41. \*\* ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА В ЗВУКОВЫХ ВОЛНАХ

(для дополнительного чтения)

**Понимайте эффект Доплера:**

Мы много раз были свидетелями того, как шум автомобиля, приближающегося издалека, становится громче, когда он проходит мимо нас и начинает уходить. Особенно это заметно, когда мы наблюдаем приближающуюся машину скорой помощи, издающая гудящую по сигналу сирены. До того, как мы приблизились к нему, звук сигнала сирены был тоньше, а когда он прошел мимо нас и начал уходить от нас, можно было заметить, что звук сирены внезапно стал громким. При этом сначала частота звука сирены при приближении к нам будет больше (следовательно, звук тоньше), а затем, когда мы пройдем мимо и начнем уходить, частота звука сирены будет меньше (следовательно, звук тоньше) (рис.41.1).

Такое изменение частоты звука называется эффектом Доплера. Этот эффект наблюдается не только в звуковых волнах, но и во всех типах волн. Этот эффект был впервые предсказан австрийским физиком Иоганном Христианом Доплером (1803-1853) в 1842 году как для звуковых, так и для световых волн.

Чтобы увидеть, что вызывает такое изменение частоты приливя, представьте, что вы находитесь на якорной лодке в открытом море (рис.41.2-а). Пусть период колебаний волны, скажем,  $T = 3 \text{ с}$ .

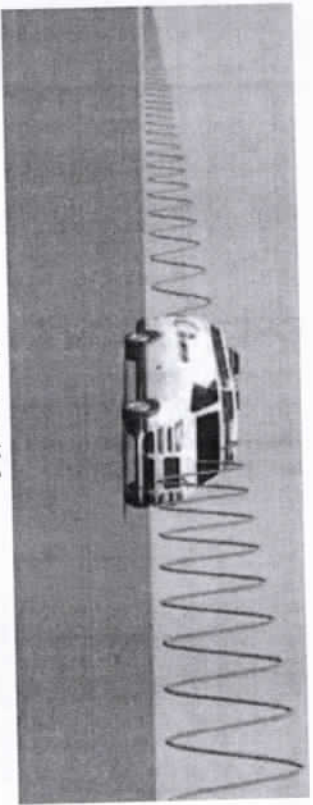


Рисунок 41.1

При этом каждые  $3$  с в килев находящейся лодки ударяет волна. Если вы установите секундомер на  $t=0$  с, вы будете записывать удары волны по мере прохождения времени  $t=3$  с;  $t=6$  с;  $t=9$  с и т. д. После этих результатов вы сделаете вывод, что это частота волны равна:  $\nu = 1/T = 1/(3\text{с}) = 0,33$  Гц.

Теперь предположим, что вы добавили двигатель 41.2-б, который начал движение в направлении, откуда идет волна, как показано на рисунке. Когда вы устанавливаете секундомер на  $t=0$  с, вы записываете удары, которые происходят с передней части лодки, за меньшее время, чем  $t=3$  с;  $t=6$  с;  $t=9$  с и т. д. (Например,  $t=2,5$  с;  $t=5$  с;  $t=7,5$  с). Потому что после одного удара лодка также движется в направлении встречного выпуклости, не дожидаясь следующего удара. Другими словами, период, который вы будете наблюдать, будет короче, чем период  $T=3$  с, когда лодка находится в покое. Из этого результата следует, что наблюдаемая вами частота  $\nu=1/T$  больше, чем частота  $\nu=0,33$  Гц, когда лодка находится в состоянии покоя (например, для случая  $T=2,5$  с,  $\nu=0,4$  Гц).

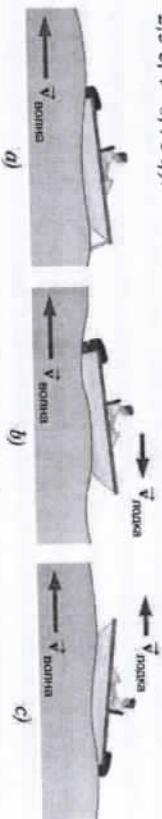


Рисунок 41.2

Обратный эффект можно наблюдать, если повернуть лодку назад и двигаться в направлении, соответствующем волне, как на рис. 4.12-с. Если вы установите секундомер на  $t=0$  с, вы будете записывать удары, которые будут происходить с задней части лодки в более короткие сроки (например,  $t=3$  с;  $t=6$  с;  $t=9$  с и т. д.), чем в другое время (например,  $t=4$  с;  $t=8$  с;  $t=12$  с).

Потому что за счет того, что вы двигаетесь в направлении движения после одного удара до следующего удара, время, необходимое для того, чтобы следующий встречный вершина достигла и ударил лодку, немного

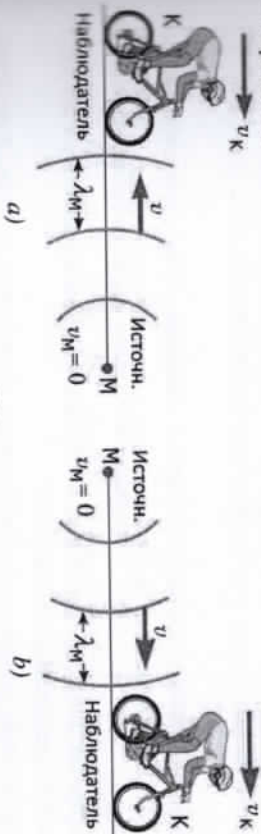
уменьшается. Другими словами, период, который вы будете наблюдать, будет длиннее, чем период  $T=3$  с, когда лодка находится в покое. Из этого результата следует, что наблюдаемая вами частота  $\nu=1/T$  будет меньше, чем частота  $\nu=0,33$  Гц, когда лодка находится в состоянии покоя (например, для случая с  $T=4$  с,  $\nu=0,25$  Гц). Основная причина появления эффектов на рисунке 4.12 с которыми мы познакомились выше, заключается в том, что относительная скорость между кораблем и волной больше или меньше скорости распространения волны.

**Эффект Доплера для случая, когда источник находится в состоянии покоя, а наблюдатель движется в движении:**

Теперь давайте посмотрим, какие эффекты наблюдаются в звуковых волнах, аналогично описанному выше. При этом мы чередуем волну в воде со звуковой волной, воду с воздушной, а наблюдателя на лодке с байкером на велосипеде. Сначала рассмотрим наблюдателя  $K$  в движении, а источник  $M$ , образующий звуковую волну, в покое (рис. 41.3). Движение наблюдателя  $K$  также можно получить в двух разных направлениях:

- наблюдатель движется в сторону источника (рис. 41.3-а);
- наблюдатель движется в сторону удаления от источника (рис. 41.3-б).

Предположим, что звуковые волны, генерируемые источником звука  $M$ , который находится в покое, распространяются в однородной среде без ветра — воздухе. Благодаря этому источник звука становится точечным источником, скорость радиального распространения звука во всех направлениях одинакова, а звук распространяется от источника сферически. На рисунке 41.3 изображено пересечение сферической волны с плоскостью изображения.



41.3-гласи

Мы принимаем частоту звуковой волны, генерируемой источником  $M$  в покое, как  $\nu$ , длину волны  $\lambda$  и скорость звука  $\nu$ . Если бы наблюдатель также оставался в состоянии покоя, он бы записал частоту звука за  $\nu$ . Другими словами, когда  $\nu_K=0$  и  $\nu_M=0$ , записанная частота будет равна частоте звуковой волны. Мы принимаем частоту звуковой волны, генерируемой

источником  $M$  в покое, как  $v$ , длину волны  $\lambda$  и скорость звука  $g$ . При движении наблюдателя в сторону источника будет скорость волны относительно наблюдателя  $g' = g + g_k$  (рис.41.2-а). Этот случай можно сравнить с рис.41.2-б. В обоих случаях длина волны  $\lambda$  неизменна, а относительная скорость равна сумме скоростей наблюдателя и волны. Так же, как мы используем формулу для скорости волны  $g = \lambda v$ , мы используем формулу для относительного движения наблюдателя  $g' = \lambda v'$ . Из них мы выведем частоту (т. е. невидимую частоту), которую с регистрирует наблюдатель  $K$ .

$$v' = \frac{g'}{\lambda} = \frac{g + g_k}{\lambda} = \frac{g + g_k}{g} v$$

Таким образом, для случая, описанного на рис. 41.3-б, частота, которую отмечает наблюдатель, будет:

$$v' = \frac{g'}{g} v = \frac{g + g_k}{g} v \quad (41.1)$$

Наблюдателем будет скорость звуковой волны относительно наблюдателя  $g' = g - g_k$  при удалении от источника звука, как на рисунке 41.3-б. Поэтому для обеих частота, с которой наблюдатель записывает это, будет:

Следовательно, частота, с которой наблюдатель отмечает будет:

$$v' = \frac{g'}{g} v = \frac{g - g_k}{g} v \quad (41.2)$$

Из двух приведенных выше формул можно сделать такие выводы:

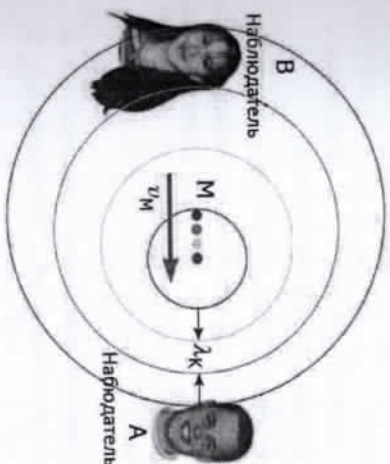
*если наблюдатель приближается к источнику звука, он регистрирует ускоренную (большую) частоту, и звук будет звучать так, как будто он замедлен;*

*если наблюдатель удаляется от источника звука, он регистрирует замедленную (меньшую) частоту, и звук будет звучать так, как будто он ускорен.*

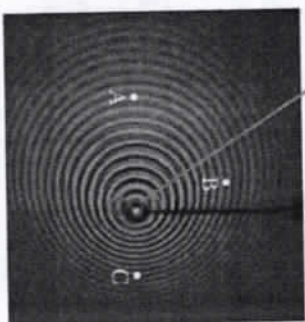
**Эффект Доплера для случая, когда наблюдатель находится в покое, а источник находится в движении:**

Рассмотрим случай, когда наблюдатель  $K$  находится в покое, а источник  $M$  движется (рис.41.4-а). Когда источник  $M$  движется в направлении наблюдателя  $A$ , источник испускает новую волну в направлении от точки справа от точки, которая испускает предыдущую. В результате наблюдатель  $A$  фиксирует расстояние между волнами так, как будто источник ускорен по сравнению с неподвижным (аналогичная ситуация наблюдается для волны, распространяющейся по поверхности воды, наглядно изображенной на

рис.41.4-б). При этом точка  $C$  кажется ближайшей к источнику, а точка  $A$  — самой дальней, но они принадлежат одному волновому фронту, т. е. являются точками, принадлежащими волновой поверхности, одновременно удаленной от источника). Следовательно, даже длина волны  $\lambda'$ , записанная наблюдателем  $M$  будет короче, чем длина волны  $\lambda$ , испускаемая источником. При каждом колебании, которое длится  $T$  времени (период колебаний),  $M$  поглощается источником на расстояние  $g_M T = \frac{g_M}{v}$ , и длина волны уменьшается на эту величину. В результате длина волны  $\lambda'$ , записанная наблюдателем, будет равна:



а)



б)

41.4-гаша

$$\lambda' = \lambda - \Delta\lambda = \lambda - \frac{g_M}{v}$$

Учитывая, что здесь звуковая волна  $\lambda = \frac{g}{v}$ , мы можем записать

приведенную выше формулу следующим образом:

$$\lambda' = \lambda - \Delta\lambda = \frac{g}{v} - \frac{g_M}{v} = \frac{g - g_M}{v} = \frac{g - g_M}{g} \lambda$$

$\lambda'$  частота, которую записывает наблюдатель, находится в этом представлении.

$$v' = \frac{g}{\lambda'} = \frac{g}{\frac{g - g_M}{g} \lambda} = \frac{g}{g - g_M} v$$

Таким образом, длина волны и частота, регистрируемые наблюдателем А при движении источника звука  $M$  к наблюдателю А, определяются по формулам:

$$\lambda' = \frac{g - g_M}{g} \lambda, \quad v' = \frac{g}{g - g_M} v \quad (41.3)$$

Следовательно, это означает, что наблюдатель А записывает волну как бы она была уменьшена, а частота-как бы она была ускорена.

Теперь возникает вопрос, что отмечает наблюдатель В на рисунке 41.4-а. В этом случае, поскольку источник  $M$  удаляется от наблюдателя В, в каждый период времени источник  $M$  смещается вправо на расстояние  $g_M T = \frac{g_M}{v}$ , и длина волны увеличивается на эту величину. В результате получается  $\lambda'$  длина волны и  $v'$  частота, которые записываются наблюдателем В:

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = \frac{g}{v} + \frac{g_M}{v} = \frac{g + g_M}{v} = \frac{g + g_M}{g} \lambda$$

$$v' = \frac{g}{\lambda'} = \frac{g}{\frac{g + g_M}{g} \lambda} = \frac{g}{g + g_M} v$$

Таким образом, длина волны и частота, записанная наблюдателем В, когда источник звука  $M$  движется к наблюдателю определяются по следующим формулам:

$$\lambda' = \frac{g + g_M}{g} \lambda, \quad v' = \frac{g}{g + g_M} v \quad (41.4)$$

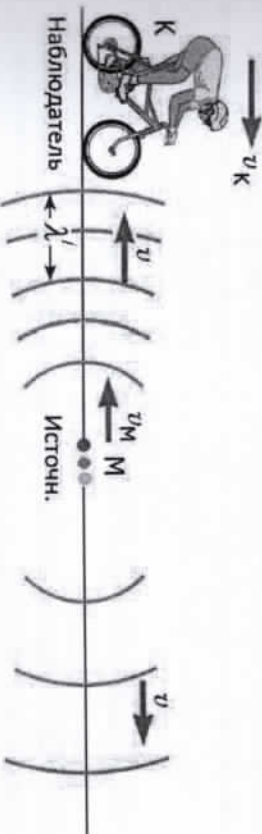
Следовательно, в этом случае наблюдатель В регистрирует волну как удлиненную, а частоту-как замедленную.

#### Эффект Доплера для механических волн в общем случае:

Рассмотрим самый общий случай — случай, когда и наблюдатель, и источник звука движутся. Это общее состояние можно рассматривать как совместную комбинацию двух состояний, с которыми мы познакомились один за другим, то есть состояния, в котором источник находится в состоянии покоя, а наблюдатель находится в движении, и состояния, в котором наблюдатель находится в движении, когда источник находится в состоянии покоя. 41.3-а, общим как для наблюдателя К на рисунке, так и для источника  $M$  на рисунке 41.4-а, как для наблюдателя А на рисунке, так и для источника  $M$ , является их относительное сближение. Поэтому для наблюдателя и источника звука, движущихся навстречу друг другу,

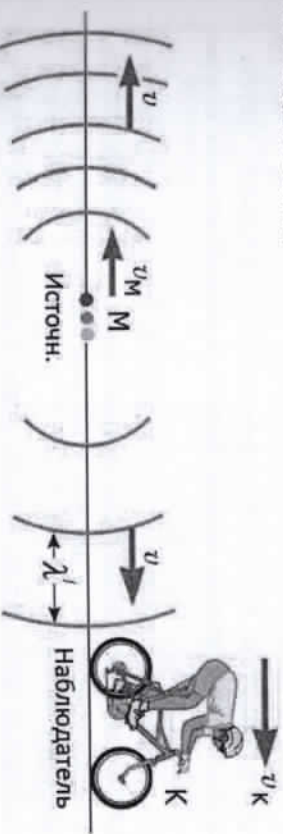
записанную частоту и длину волны можно представить следующим образом (рис. 41.5):

$$v' = \frac{g'}{g - g_M} v = \frac{g + g_K}{g - g_M} v, \quad \lambda' = \frac{g - g_M}{g} \lambda \quad (41.5)$$



41.5-гзшт

Из приведенной выше формулы видно, что сокращение длины волны, которое записывает наблюдатель, не зависит от того, движется наблюдатель или находится в покое.



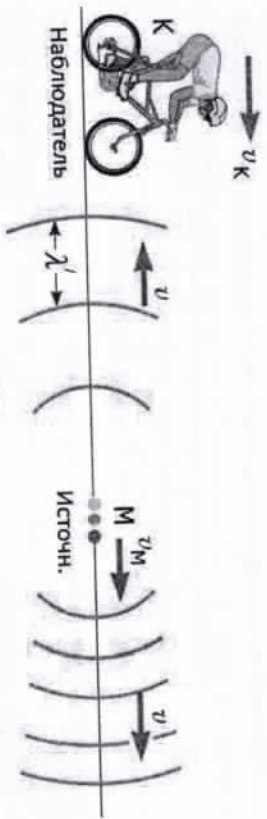
41.6-гзшт

41.3-б, общим как для наблюдателя К на рисунке, так и для источника  $M$  на рисунке 41.4-а, наблюдателя В на рисунке, так и для источника  $M$  является их относительное расстояние. Поэтому для наблюдателя и источника звука, движущегося в противоположных направлениях, записанную частоту и длину волны можно представить как (рис. 41.6):

$$v' = \frac{g'}{g + g_M} v = \frac{g + g_K}{g + g_M} v, \quad \lambda' = \frac{g + g_M}{g} \lambda \quad (41.6)$$

Из приведенной выше формулы видно, что длина волны, которую записывает наблюдатель, не зависит от того, движется наблюдатель или находится в покое.





41.7-гизм

Теперь давайте посмотрим, как будет выглядеть эффект Доплера для случая, когда наблюдатель и источник движутся по одному направлению, как на рисунке 41.7. При этом регистрируемую частоту и длину волны можно представить как (рис. 41.7):

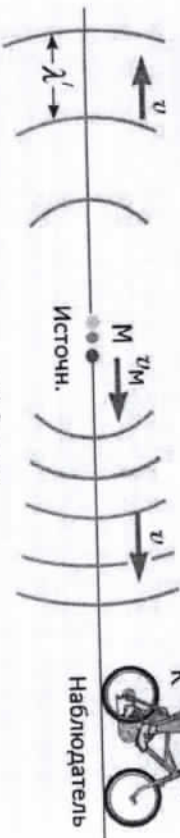
$$v' = \frac{g}{g - g_M} v = \frac{g - g_K}{g - g_M} v, \quad \lambda' = \frac{g + g_M}{g} \lambda \quad (41.7)$$

В этом, в свою очередь, можно рассмотреть еще 3 случая:

а) скорость наблюдателя больше скорости источника ( $g_K > g_M$ ), при которой наблюдатель все больше приближается к источнику, частота, с которой он регистрируется, меньше частота, с которой источник излучает ( $v' < v$ );

б) скорость наблюдателя и источника взаимно равны ( $g_K = g_M$ ), при этом относительное положение наблюдателя и источника не изменяется, частота, с которой регистрируется, и частота, с которой распространяется источник, взаимно равны ( $v' = v$ );

в) скорость наблюдателя меньше скорости источника ( $g_K < g_M$ ), при которой наблюдатель все больше удаляется от источника, частота, с которой регистрируется, больше частота, с которой источник излучает ( $v' > v$ );



41.8-гизм

Теперь давайте посмотрим, как будет выглядеть эффект Доплера для случая, когда наблюдатель и источник движутся в одном направлении, как на

рисунке 41.8. При этом регистрируемую частоту и длину волны можно представить как (рис. 41.8):

$$v' = \frac{g'}{g + g_M} v = \frac{g - g_K}{g + g_M} v, \quad \lambda' = \frac{g + g_M}{g} \lambda \quad (41.8)$$

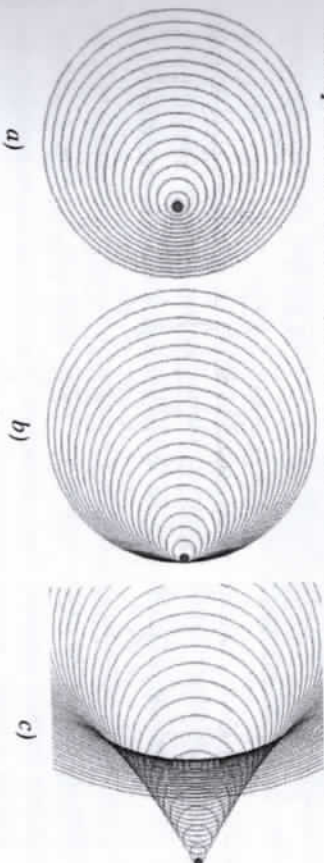
При этом независимо от того, являются ли скорости наблюдателя и источника больше или меньше друг друга в количественном отношении, частота, с которой наблюдатель регистрируется, будет меньше частоты источника ( $v' < v$ ).

Теперь мы суммируем все частные случаи, которые мы рассмотрели выше, и запишем их в табличном виде

41.1-таблица

Доплеровский сдвиг	Наблюдатель находится в покое	Наблюдатель движется к источнику	Наблюдатель удаляется от источника
Источник находится в покое	$v' = v$	$v' = \frac{g + g_K}{g} v$	$v' = \frac{g - g_K}{g} v$
Источник движется к наблюдателю	$v' = \frac{g}{g - g_M} v$	$v' = \frac{g + g_K}{g - g_M} v$	$v' = \frac{g - g_K}{g - g_M} v$
Источник удаляется от наблюдателя	$v' = \frac{g}{g + g_M} v$	$v' = \frac{g - g_K}{g + g_M} v$	$v' = \frac{g + g_K}{g + g_M} v$

Быстрое движение от звука. Ударяя волны:



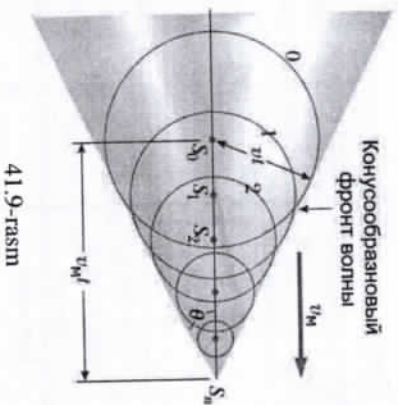
41.8-гизм

Во всех случаях, с которыми мы ознакомились выше, для случая, когда скорость движения источника волны меньше скорости волны. Потому что

скорости, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни и технике — велосипед, мотоцикл, автомобиль, поезд и самолет — находятся в диапазоне скоростей 5-200 м/с, и все они меньше, чем скорость звука 340 м/с.

Теперь возникает вопрос: какое событие произойдет, если скорость источника волны будет равна или больше скорости распространения волны? На рисунке 41.8 изображена аналогичная ситуация, когда первоначально скорость источника мала (рис. 41.8-а), равна (рис. 41.8-в) и больше (рис. 41.8-с), чем скорость распространения волны.

Теперь давайте подробнее рассмотрим случай, когда скорость распространения волны больше скорости источника волны. Пусть источник, находящийся в точке  $S_0$  в произвольное время  $t=0$ , движется равномерно вправо. Через некоторое время этот источник находится в точке  $S_1$ , а позже в точке  $S_2, S_3, \dots, S_n$  (рис. 41.9). Волновой фронт, распространяющийся из точки  $S_0$ , находится на поверхности сферы с радиусом  $g_1 t$  в данный момент времени  $t$ .

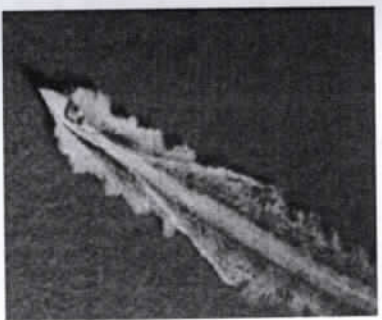


41.9-гашп

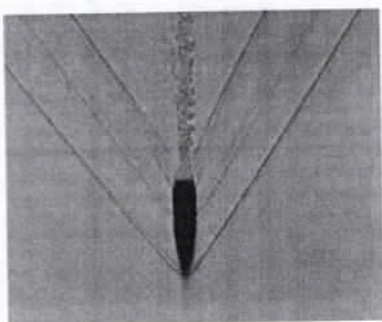
В течение этого промежутка времени источник волны будет смещен на расстояние  $g_M t$ . Обратим внимание, что прямые на рисунке 41.9-это поверхности, к которым достигают волновые фронты, распространяющиеся из всех точек. При этом мы наблюдаем, что все волновые поверхности находятся внутри конуса с половинной угла  $\theta$  на концах. Используем синус угла.

$$\sin \theta = \frac{g_1 t}{g_M t} = \frac{g}{g_M} \quad (41.9)$$

Из приведенной выше формулы когда мы определяем соотношение  $g_M/g$  это отношение является безразмерной величиной, которая называется числом Маха. Когда число Маха больше единицы, скорость источника больше скорости звука, в которой, имеет значение  $g_M > 1$ . Когда число Маха больше единицы, волновой фронт создает волну, называемую ударной волной. Эта волна также называется V-образной волной или конической волной. Чем больше число Маха, тем острее становится кончик конуса.



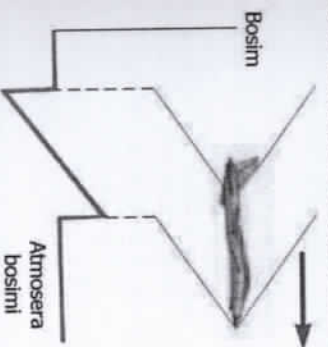
a)



b)

41.10-гашп

В современной военной авиации большое внимание уделяется числом Маха боевых ракет. Например, скорость таких американских военных ракет, как F-27 и F-35, таких как SU-27, SU-34, SU-57, MIG-31, будет в диапазоне от 3 до 6 мах. Кроме того, межконтинентальная сверхзвуковая ракета-Авангард Российской Федерации может развивать скорость до 20 мах. Все эти военные ракеты называются сверхзвуковыми ракетами.



a)



b)

41.11-гашп

На рисунке 41.10-а изображена конусовидная волна (ударная волна), образующаяся, когда скорость судна в несколько раз превышает скорость волны, распространяющейся по поверхности воды. 41.10-б, а на рисунке приведено стробоскопическое изображение конической волны, образуемой попутно быстро летящей оси звука. Вот как была сфотографирована конусообразная волна, вызванная движением стрелки, ведь вполне естественно, что воздух не виден невооруженным глазом. Давайте изучим это на примере ракеты, которая летит быстрее звука на рисунке 41.11. На рисунке 41.11-а, изображено образование двух конических волн за счет

крыльев в носу и хвосте самолета. Кроме того, описаны резкие изменения давления воздуха вокруг крыльев. Именно из-за этих резких изменений происходит конденсация водяных паров, содержащихся в воздухе. В результате образуются крошечные капельки воды, образующие в хвостовой части ракеты форму белесого тумана (рис. 41.11-б).

Ударная волна (коническая волна), достигая тел, воздействует на них с большой силой. Например, если ракета, пролетая мимо нас, издает неприятный шум, который προκαывает уши, то на нее также действует сила, аналогичная силе ветра. Иногда эта ударная волна имеет гораздо более разрушительную силу. Из — за ударной волны, образующейся при взрыве больших количеств динамита или химических бомб, оконные стекла зданий на расстоянии 3–5 км могут пролететь. А при взрыве ядерных бомб ударная волна более разрушительна, чем генерируемое излучение. Образующаяся при этом ударная волна может вспениваться от удара о корень дерева в 20 км от места взрыва. При этом даже краски на кузовах легковых автомобилей и автобусов превращаются в порошок, как пыль, которая отделяется, когда ковер трескается.

**Вопросы по теме:**

1. Как изменился звук автомобиля, когда он приближается к издавателю и проходит мимо вас?
2. Что такое эффект Доплера? Когда происходит этот эффект?
3. Испытчик остается спокойным, записывая доплеровский сдвиг только для случая, когда наблюдатель движется.
4. Запишите сдвиг Доплера для случая, когда источник и наблюдатель движутся навстречу друг другу.
5. Запишите сдвиг Доплера для случая, когда источник и наблюдатель движутся навстречу друг другу.
6. Ударная волна? Когда он формируется? Как еще называется эта волна?
7. Что такое максимальное число? Какова его ценность в современных военных ракетах?
8. Почему за сверхзвуковыми скоростными ракетами скрывается белесый туман?
9. Охарактеризуйте разрушительные свойства ударной волны.

**Решение задач:**

1. Поезд, издающий звук частотой 500 Гц, движется в сторону наблюдателя со скоростью 40 м/с. Какова видимая частота для наблюдателя? Температура воздуха 24°C.

Дано	Решение
$\nu = 500 \text{ Гц}$	Определяем абсолютную температуру. $T = t + 273 = 24 + 273 = 297 \text{ К}$ Определим скорость распространения звука в воздухе.
$\nu_M = 40 \text{ м/с}$	
$t = 24^\circ\text{C}$	
$\nu_K = ?$	$\nu = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = \sqrt{\frac{1,4 \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 297 \text{ К}}{29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}} = 345 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Теперь для случая, когда наблюдатель находится в покое и источник приближается к наблюдателю, мы определяем частоту, записанную наблюдателем, по приведенной формуле.

$$\nu' = \frac{\nu}{\nu - \nu_M} \nu = \frac{345 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{345 \frac{\text{м}}{\text{с}} - 40 \frac{\text{м}}{\text{с}}} \cdot 500 \text{ Гц} = 565,6 \text{ Гц}$$

Ответ:  $\nu_K = 565,6 \text{ Гц}$

2. Рано утром включился будильник часов и начал звонить с частотой 600 Гц. Читатель, который был в восторге от сна, выключил часы и попытался снова заснуть. Но он продолжал звонить, не выключаясь, из-за неисправности кнопки будильника на часах. Тогда разгневанный ученик выбросил часы из окна четвертого этажа на высоте 15 м. С какой частотой читатель слышит звон часов, предшествующий удару о поверхность Земли? Скорость звука 343 м/с принять за ускорение свободного падения 9,8 м/с<sup>2</sup>.

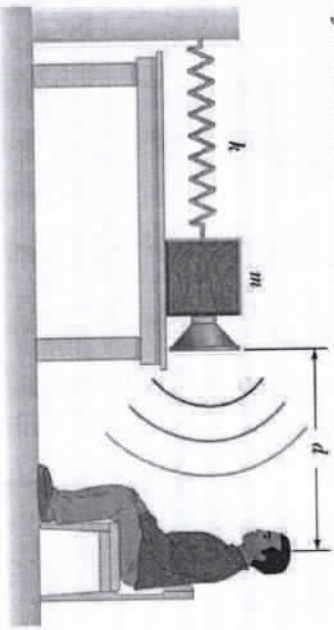
Дано	Решение
$\nu = 600 \text{ Гц}$	Часы действуют как источник, который удаляется от наблюдателя, когда он падает на землю. Скорость, с которой часы бьют о землю, определяется по формуле, знакомой нам из кинематики.
$\nu = 343 \text{ м/с}$	
$h = 15 \text{ м}$	
$g = 9,8 \text{ м/с}^2$	
$\nu_K = ?$	$g_{\text{пад}} = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 15 \text{ м}} \approx 17 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 9 \text{ м/с}$

Теперь определяемся с частотой падения для читателя.

$$\nu' = \frac{\nu}{\nu + \nu_M} \nu = \frac{343 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{343 \frac{\text{м}}{\text{с}} + 17 \frac{\text{м}}{\text{с}}} \cdot 600 \text{ Гц} \approx 571,7 \text{ Гц}$$

Ответ:  $\nu_K = 571,7 \text{ Гц}$

3. Колонка, находящаяся на гладкой поверхности стола, крепится к вертикальной стене через пружину с жесткостью  $k = 20 \text{ Н/м}$ , как на рисунке. Совокупная масса колонны и пружины равна  $m = 5 \text{ кг}$ . Благодаря упругости пружины колонна свободно колеблется с амплитудой  $A = 0,5 \text{ м}$ . Колонка издает моночастотный звук  $\nu = 440 \text{ Гц}$ . Определите наибольшую и наименьшую видимые частоты, которые получает наблюдатель.



Дано

$$\nu = 440 \text{ Гс}$$

$$A = 0,5 \text{ м}$$

$$m = 5 \text{ кг}$$

$$k = 20 \text{ Н/м}$$

$$\nu_{\text{max}}, \nu_{\text{min}} = ?$$

Решение

Максимальная скорость пружины достигается во время своего колебания только в момент перехода из положения равновесия. Это значение скорости называется амплитудой, и оно равно:

$$v_{\text{max}} = A \sqrt{\frac{k}{m}} = 0,5 \text{ м} \cdot \sqrt{\frac{20 \text{ Н/м}}{5 \text{ кг}}} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Пружина может приближаться к наблюдателю или удаляться от него за счет колебательного движения. Значение видимой частоты, принимаемой наблюдателем, является наибольшим при приближении колонки и наименьшим при удалении. Определим эти значения интегральной частоты. Воспринимаем скорость звука как  $340 \text{ м/с}$

$$\nu_{\text{max}} = \frac{v}{v - v_{\text{max}}} \nu = \frac{340 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{340 \frac{\text{м}}{\text{с}} - 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}} \cdot 440 \text{ Гц} = 441,3 \text{ Гц}$$

$$\nu_{\text{min}} = \frac{v}{v + v_{\text{max}}} \nu = \frac{340 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{340 \frac{\text{м}}{\text{с}} + 1 \frac{\text{м}}{\text{с}}} \cdot 440 \text{ Гц} = 538,7 \text{ Гц}$$

Ответ:  $\nu_{\text{max}} = 441,3 \text{ Гц}$ ,  $\nu_{\text{min}} = 538,7 \text{ Гц}$

### ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ГЛАВЕ V

Лабораторная работа: № 7.

Проверка закона математического маятника и определение ускорения свободного падения с помощью математического маятника.

Цель работы: Изучение ускорения свободного падения с помощью математического маятника.

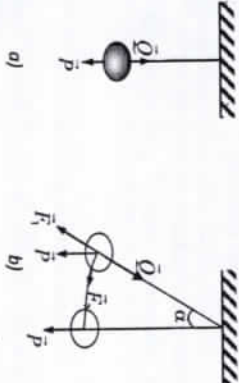
Необходимые инструменты и оборудование:

Штатив, нить, шарик с отверстием, линейка, секундомер.

Математический маятник	Лабораторный источник питания	секундомер

#### ТЕОРИЯ

Материальная точка, подвешенная на нерастяжимой, невесомой нити называется математическим маятником.



Период математического маятника определяется по формуле  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$

$l$  - длина маятника  $g$  - ускорение свободного падения. Из формулы 1 можно написать

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$$

Если за время  $t$  маятник совершил  $N$  полных колебаний тогда

$$T = \frac{t}{N} \quad g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$$

Отсюда

### Порядок выполнения работы

1. Установите на столе штатив. Подвесьте шарик на нити к штативу.
2. Линейкой измерьте длину математического маятника.
3. Отклоните шарик на 5–10 см и отпустите, в этот же моментпустите в ход секундомер.
4. Определите время за 30 полных колебаний.
5. Показания секундомера заполните в таблицу.
6. По формуле 3 вычислите  $T$  – период колебаний маятника.
7. С помощью формулы 4 вычислите  $g$  – ускорения свободного падения.
8. Повторите опыт для 40, 50 полных колебаний, не изменяя длину маятника.
9. Определите период колебаний маятника для каждого раза.
10. Определите абсолютную и относительную ошибку.
11. Заполните таблицу.

$l$	$N$	$t$	$T$	$g$	$\bar{g}$	$\Delta g$	$\bar{\Delta g}$	$\epsilon = \frac{\bar{\Delta g}}{g} \cdot 100\%$
М	сек	сек	М/С <sup>2</sup>	М/С <sup>2</sup>	М/С <sup>2</sup>	М/С <sup>2</sup>	М/С <sup>2</sup>	
	30							
	40							
	50							

### Вопросы

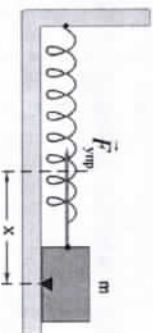
1. Что такое математический маятник?
2. От чего зависит период колебания математического маятника?
3. Как зависит период колебания от частоты?
4. Объясните на рисунке силы, действующие на колеблющийся шарик?

### Лабораторная работа: № 8.

#### Изучению закономерности пружинного маятника

**Цель работы:** Исследовать, от каких величин зависит период колебаний пружинного маятника.

**Задание:** Изучить собственные колебания на примере пружинного маятника. Основные теоретические сведения и соотношения



Груз массы  $m$ , прикрепленный к пружине жесткости  $k$ , составляет систему, способную совершать в отсутствие трения свободные гармонические колебания под действием упругой силы (рис. 1)

$$F_{\text{упр}} = -kx \text{ (закон Гюка).}$$

Учтем что: *ускорение является второй производной координаты тела  $x$  по времени  $t$ :*  $a(t) = x''(t)$ , тогда второй закон Ньютона для груза на пружине примет вид:

$$m\ddot{x} = -kx, \text{ или } x'' + \omega_0^2 x = 0 \text{ где } \omega_0^2 = \frac{k}{m}.$$

Все физические системы (не только механические), описываемые уравнением  $x'' + \omega_0^2 x = 0$ , способны совершать свободные гармонические колебания, так как решением этого уравнения являются гармонические функции ( $\sin$  или  $\cos$ ) вида:

$$x = X_m \cos(\omega t + \varphi_0).$$

Частота  $\omega_0$  называется **собственной частотой** колебательной системы.  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ .

Период  $T$  гармонических колебаний груза на пружине равен:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Физические свойства колебательной системы **определяют только собственную частоту колебаний  $\omega_0$  или период  $T$** . Амплитуда  $X_m$  и начальная фаза  $\varphi_0$  определяются способом, с помощью которого система выведена из состояния равновесия. Если, например, груз был смещен из положения равновесия на расстояние  $\Delta l$  и затем в момент времени  $t = 0$  отпущен без начальной скорости, то  $X_m = \Delta l$ ,  $\varphi_0 = 0$ . Если же грузу, находящемуся в положении равновесия, с помощью резкого толчка была сообщена начальная скорость  $\pm v_0$ , то  $X_m = v_0 \sqrt{\frac{m}{k}}$ ,  $\varphi_0 = \pm \frac{\pi}{2}$ .

Таким образом, амплитуда  $X_m$  и начальная фаза  $\varphi_0$  определяются **начальными условиями**.

При горизонтальном расположении системы пружина–груз сила тяжести, приложенная к грузу, компенсируется силой реакции опоры. Если же груз подвешен на пружине, то сила тяжести направлена по линии движения груза. В положении равновесия пружина растянута на величину  $x_0$ , равную  $x_0 = \frac{mg}{k}$  и колебания совершаются около этого нового положения равновесия. Приведенные выше выражения для собственной частоты  $\omega_0$  и периода колебаний  $T$  справедливы и в этом случае.

### Порядок выполнения работ

- Изучите инструкцию к лабораторной работе.
- Повесьте пружину на штатив в определенном положении.
- С помощью весов отмерьте соответственно массы груза.
- Подвесьте на пружину массивную нагрузку и отпустите ее из положения равновесия с отклонением вниз на 30-50 мм, и в этот момент запустите электронный секундомер. Маятник начинает колебаться. Секундомер отсчитывает время.
- Определите время, на полное колебание маятника  $N$  раз ( $N=40-50$ ) с помощью секундомера.
- Из соотношения  $T = t/N$  вычислите период колебаний маятника.

1-Таблица

№	$m_1$ кг	$n$	$t$ (с)	$T = \frac{t}{n}$ (с)	$k_1$ ( $\frac{H}{M}$ )	$\bar{k} (\frac{H}{M})$	$\Delta k_1$ ( $\frac{H}{M}$ )	$\Delta \bar{k} (\frac{H}{M})$	$\varepsilon$ %
1									
2									
3									

$k = k + \Delta k$

Контрольные вопросы

- Что называют механическими колебаниями? Приведите примеры.
- Какие колебания называются гармоническими?
- Выведите уравнение гармонических колебаний.
- Под действием каких сил совершаются свободные и вынужденные колебания?
- Что называется смещением и амплитудой колебаний?
- Что называется периодом, частотой и циклической частотой колебаний?
- Какой физический смысл фазы гармонических колебаний? Что понимают под начальной фазой?
- Выведите зависимость от времени для скорости и ускорения тела при гармонических колебаниях. Изобразите эти зависимости графически.
- Приведите формулы собственной частоты и периода гармонических колебаний груза на пружине и малых колебаний математического маятника

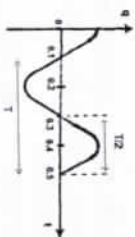
ТЕСТЫ ПО ГЛАВЕ V

- Волна с частотой  $3 \text{ Гц}$  распространяется со скоростью  $2,4 \text{ м/с}$ . На сколько радиан больше разности фаз колебаний в двух точках, находящихся на расстоянии  $20 \text{ см}$  друг от друга?  
 А)  $\pi/6$     В)  $\pi/4$     С)  $\pi/2$     Д)  $\pi/3$     Е)  $\pi$

- Какова частота и период переменного тока, если циклическая частота равна  $1000 \pi \text{ рад/с}^2$ ?  
 А)  $0,005 \text{ с}$ ;  $200 \text{ Гц}$     В)  $0,002 \text{ с}$ ;  $500 \text{ Гц}$     С)  $0,02 \text{ с}$ ;  $50 \text{ Гц}$   
 Д)  $0,001 \text{ с}$ ;  $1000 \text{ Гц}$     Е)  $0,01 \text{ с}$ ;  $100 \text{ Гц}$

- Частота электромагнитных колебаний в колебательном контуре  $10^5 \text{ Гц}$ . Каков период колебаний (мкс)?  
 А)  $10^4$     В)  $1000$     С)  $100$     Д)  $10$     Е)  $1$

- Зависимость заряда конденсатора контура колебаний от времени изображена на графике.



- Какова частота колебаний заряда (Гц)?  
 А)  $5$     В)  $2,5$     С)  $3,3$     Д)  $10$     Е)  $11\pi$

- Как изменится амплитуда колебаний, если полная механическая энергия пружинного маятника увеличится в 36 раз?  
 А) не изменится    В) уменьшится в 6 раз  
 С) увеличится в 6 раз    Д) уменьшится в 36 раз

- Полная механическая энергия свободных колебаний груза, подвешенного к пружине, равна  $5 \text{ Дж}$ . Какой будет полная механическая энергия колебаний (Дж), если высота груза над землей увеличится в 2 раза?  
 А)  $2,5$     В)  $5$     С)  $10$     Д)  $12,5$

- Закон колебаний пружинного маятника с жесткостью  $100 \text{ Н/м}$  имеет вид  $x=0,01 \cos 5t$  (м). Какова максимальная кинетическая энергия маятника (мДж)?  
 А)  $1$     В)  $5$     С)  $50$     Д)  $100$

- Груз массой  $0,2 \text{ кг}$ , подвешенный на пружине с жесткостью  $500 \text{ Н/м}$  колеблется. Какова максимальная скорость груза (м/с), если амплитуда колебаний равна  $2 \text{ см}^2$ ?  
 А)  $8$     В)  $5$     С)  $4$     Д)  $1$

- Исходи из уравнения  $x = 20A \cos 15t$ , какова амплитуда колебаний гармонически колеблющегося тела?  
 А)  $\cos 15$     В)  $15$     С)  $20A$     Д)  $20$

- Напишите уравнение гармонического колебания с амплитудой  $20 \text{ см}$ , периодом колебаний  $5 \text{ с}$ , начальной фазой  $0$ .  
 А)  $x = 0,2 \sin 0,4\pi t$     В)  $x = 0,2 \sin 5\pi t$   
 С)  $x = 20 \sin 0,2\pi t$     Д)  $x = 20 \sin (0,4\pi t + \pi/4)$

11. Составьте уравнение гармонических колебаний с амплитудой  $l$  мм, частотой  $1000 \text{ Гц}$ , начальной фазой  $\pi/3$ .
- A)  $x = 0,001 \cos(2000\pi t + \pi/3)$     B)  $x = \sin(1000\pi t + \pi/3)$   
 C)  $x = \cos(1000\pi t + \pi/3)$     D)  $x = 0,001 \sin(2000\pi t)$
12. На каком частоте периода смещение колеблющегося тела из положения равновесия будет равно половине амплитуды?
- A)  $T/12$     B)  $T/3$     C)  $T/4$     D)  $T/8$
13. На какой частоте периода гармонически колеблющегося тело пройдет первую половину расстояния от положения равновесия до крайнего положения?
- A)  $T/12$     B)  $T/3$     C)  $T/4$     D)  $T/6$
14. Как изменится период колебаний, если пружинный маятник установить на спускающийся лифт с ускорением  $a < g$ ?
- A) уменьшается    B) зависит от величины  
 C) не изменяется    D) увеличивается
15. Пружинный маятник перенесли с Земли на планету, ускорение силы тяжести которой в 4 раза больше земного. Как изменится при этом период его колебаний?
- A) не изменяется    B) уменьшается в 4 раза    C) увеличивается в 4 раза  
 D) уменьшается в 2 раза    E) увеличивается в 2 раза
16. Как изменится частота продольных колебаний при увеличении массы груза, подвешенного на пружине, в 4 раза?
- A) увеличивается в 2 раза    B) увеличивается в 4 раза    C) уменьшается в 2 раза  
 D) уменьшается в 2 раза    E) не изменяется
17. С какой частотой  $\omega_2$  будет колебаться та же самая нагрузка, которая висит на пружине с жесткостью  $k_1$ , если нагрузка, подвешенная на пружине с крутизной  $k_2 = 4k_1$ , будет колебаться?
- A)  $\omega_2 = 4\omega_1$     B)  $\omega_2 = \omega_1/2$     C)  $\omega_2 = \omega_1$     D)  $\omega_2 = 2\omega_1$
18. Какова частота колебаний пружинного маятника ( $\Gamma$ ч) с жесткостью  $100 \text{ Н/м}$ , массой его груза  $10 \text{ г}$ ?
- A) 6    B) 8    C) 10    D) 16
19. Каково отношение масс грузов, висающих на каждую пружину, если отношение частот колебаний двух одинаковых пружинных маятников  $\sqrt{2}:\sqrt{5}$ ?
- A)  $\sqrt{2}:\sqrt{5}$     B) 5:2    C) 4:25    D) 1: $\sqrt{2}$ .

20. При какой нагрузке ( $kz$ ) на пружину с жесткостью  $10 \text{ Н/м}$  образуются маятник с периодом колебаний  $1 \text{ с}$ ?
- A) 10    B) 0,25    C) 2,5    D) 0,025
21. Период колебаний тела, подвешенного на пружине, равен  $T$ . Если масса груза увеличивается на  $60 \text{ г}$ , период увеличивается в 2 раза. Какова начальная масса тела ( $g$ )?
- A) 10    B) 20    C) 40    D) 60
22. Груз, подвешенная на пружине, совершает гармонические колебания. Как изменится период колебания, если та же груз висит на такой же пружине, но в 4 раза длинной пружине?
- A) увеличивается в 2 раза    B) уменьшается в 4 раза  
 C) увеличивается в 4 раза    D) уменьшается в 2 раза
23. Как изменится период его колебаний, если пружинный маятник разрезать пополам?
- A) увеличивается в 2 раза    B) уменьшается в 2 раза  
 C) не изменяется    D) уменьшается в  $\sqrt{2}$  раза
24. Как изменится период колебаний пружинного маятника, если пружину укоротить в 2 раза, а массу груза увеличить в 2 раза?
- A) не меняется    B) 2 раза уменьшается  
 C) 2 раза увеличивается    D) 4 раза уменьшается
25. Как изменится период колебаний, если амплитуда колебаний математического маятника увеличится в 2 раза?
- A) не изменяется    B) увеличивается в 2 раза  
 C) уменьшается в 2 раза    D) увеличивается в 4 раза
26. Какова длина волны плоской волны, распространяющейся по оси  $Ox$ , если наименьшее расстояние между двумя точками, колеблющимися в противоположной фазе, равно  $1 \text{ м}$ ?
- A) 1    B) 2    C) 4    D)  $4\pi$     E)  $8\pi$
27. Наблюдатель установил, что расстояние между двумя вершинами морской волны составляет  $12 \text{ м}$ . Сколько м/с составят скорость распространения волны, если через каждые  $6 \text{ с}$  мимо нее проходит одна волновая вершина?
- A) 2    B) 4    C) 6    D) 12    E) 18

28. Наблюдатель услышал звук сирены через 5 с после звукового сигнала. На каком расстоянии (м) он находился от наблюдателя, если частота звука сирены  $2 \text{ кГц}$ , длина волны  $15 \text{ см}$ ?
- A) 100 B) 10000 C) 3000 D) 2000 E) 1500
29. Сколько метров составит длина волны, если расстояние между узлами стоячей волны равно  $0,5 \text{ м}$ ?
- A) 0,25 B) 0,5 C) 0,75 D) 1 E) 2
30. Какова длина волны звука в воздухе с частотой  $20 \text{ кГц}$  (м)? Скорость звука в воздухе составляет  $340 \text{ м/с}$ .
- A) 7 B) 27 C) 7 D) 17 E) 170
31. Человек, находящийся в  $1200 \text{ м}$  от поезда, услышал гул от поезда через 4 ч после того, как он зазвучал. Какова длина волны звука гулка (см), если частота гулка равна  $1 \text{ кГц}$ ?
- A) 3 B) 300 C) 30 D) 15 E) 60

#### ЗАДАНИЯ ПО ГЛАВЕ V

1. Какой будет максимальная скорость (м/с) тела, если максимальная потенциальная энергия колебания тела массой  $20 \text{ г}$ , подвешенного на пружине, равна  $1 \text{ Дж}$ ?
2. Механические колебания происходят по закону  $x = 0,3 \cos(16\pi t + \pi/2)$ . Найти период колебаний (с).
3. Уравнение движения гармонически колеблющегося тела  $x = 0,5 \cos 10\pi t$ , какова частота колебаний тела (Гц)?
4. Закон колебаний пружинного маятника массой  $0,1 \text{ кг}$  имеет колебание  $x = 0,05 \sin 10t$  (м). Найти жесткость пружины (Н/м).
5. Каково (см) смещение гармонически колеблющейся точки по закону косинуса в фазе  $5\pi/3$ , если смещение в фазе  $\pi/3$  равно  $1 \text{ см}$ ?
6. На пружину диаметром  $160 \text{ Н/м}$  подвешивалась нагрузка в  $400 \text{ г}$ . Какова частота колебаний маятника (Гц)?
7. Пружина нагружена  $100 \text{ г}$ , и она колеблется  $120$  раз в минуту. Какова жесткость пружины (Н/м)?
8. Какова масса груза (кг), который при подвешивании на пружине с жесткостью  $500 \text{ Н/м}$  совершает 5 продольных колебаний за  $4 \text{ с}$ ?

9. Нагрузка, подвешенная на пружину с жесткостью  $125 \text{ Н/м}$ , колеблется в 8 раз за  $10 \text{ с}$ . Какова масса груза (кг)?  $\pi^2 = 10$ .
10. На пружину подвешивается груз массой  $1 \text{ кг}$ , которая растягивается на  $1,5 \text{ см}$  под действием силы  $6 \text{ Н}$ . Найти период колебаний груза (с).
11. Пружина растягивается на  $10 \text{ см}$  под действием на нее нагрузки. Найти период продольных колебаний маятника (с).  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .
12. На какую длину под действием собственной нагрузки растягивается пружинный маятник с периодом колебаний  $0,1 \text{ с}$  (мм)?
13. Во сколько раз увеличивается период колебаний математического маятника при его перемещении с Земли на Луну?  $g_{\text{З}} = 1,6 \text{ м/с}^2$ ,  $g_{\text{Л}} = 10 \text{ м/с}^2$ .
14. Период колебаний первого маятника равен  $8\text{с}$ , второго  $6\text{с}$ . Сколько секунд составляет период колебаний математического маятника, длина которого равна сумме их длин?
15. Период колебаний первого математического маятника равен  $5\text{с}$ , второго  $4\text{с}$ . Каков период колебаний маятника (с), длина которого равна разности длин этих маятников?
16. Какова длина волны (м), если в интервале  $18 \text{ м}$  находится  $4,5$  длины волны?
17. Разность фаз колебаний двух точек, лежащих на одной прямой, проведенной в направлении распространения волны, равна  $2\pi$ . Какова длина волны, если расстояние между этими точками равно  $2 \text{ м}$ ?
18. Долка распространяется на волне, со скоростью  $1,5 \text{ м/с}$ . Расстояние между двумя ближайшими волнами составляет  $9 \text{ м}$ . Найти период колебаний ложки (с).
19. Волна с частотой колебаний  $165 \text{ кГц}$  распространяется со скоростью  $330 \text{ м/с}$ . Какова длина волны (м)?
20. Какова скорость распространения звука в данной среде (м/с), если Эхо, отражающееся от препятствия на расстоянии  $1,7 \text{ км}$  от источника звука, было слышно через  $10 \text{ с}$  после того, произведен звук?
21. Когда звук переходит из воздуха в воду, как изменяется его длина волны? Скорость звука в воздухе  $v_1 = 330 \text{ м/с}$ , скорость в воде  $v_2 = 1485 \text{ м/с}$ .
22. Как изменяется длина волны при переходе звука из воздуха в сталь? Скорость звука в воздухе равна  $340 \text{ м/с}$ , а в стали  $5100 \text{ м/с}$ .



23. Глубина моря определяется с помощью эхолота. Какова глубина моря ( $m$ ), если ультразвуковые импульсы, посылаемые от эхолота, возвращаются через  $2\text{ с}$ ? Скорость распространения звука в воде составляет  $1480\text{ м/с}$ .

24. При определении глубины моря с помощью эхолота звуковой сигнал возвращался через  $6\text{ с}$  после отправки. Какова скорость звука в воде ( $m/c$ ), если глубина моря составляет  $4500\text{ м}$ ?

25. Интенсивность звука  $I = 1\text{ Вт/м}^2$ . Чему равна средняя объемная плотность энергии звуковой волны  $\omega$ , если звук распространяется при нормальных условиях?

26. Наблюдатель, находящийся на расстоянии  $\ell = 800\text{ м}$  от источника звука, слышит звук из воздуха с опозданием  $\Delta t = 1,7\text{ с}$  относительно звука из воды. Найти скорость звука в воде, если температура воздуха  $T = 320\text{ К}$ .

27. Мимо неподвижного электропровода с частотой сигнала  $\nu = 300\text{ Гц}$  проходит поезд со скоростью  $v_H = 40\text{ м/с}$ . Какова видимая частота гудка для пассажира в поезде? а) поезд приближается к электропроводу; б) поезд отходит от электропровода. Воспринимайте скорость звука как  $340\text{ м/с}$ .

28. При прохождении поезда мимо неподвижного наблюдателя громкость звука сигнала резко меняется. Чему равно относительное изменение частоты  $\Delta\nu/\nu$ , если скорость поезда  $v_H = 15\text{ м/с}$ ? Воспринимайте скорость звука как  $340\text{ м/с}$ .

## ГЛАВА VI. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

В этой главе мы познакомимся с колебательным контуром, образующим электрические колебания. Выказываются мнения о сходстве электрических и механических величин.

Изучим закон Ома и закон Джоуля-Ленца для цепи переменного тока. В

этой главе мы узнаем о генерации, распространении, передаче и когерентности радиоволн, а также о типах радиоволн.



### § 42. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ. ФОРМУЛА ТОМСОНА

Периодические или почти периодические изменения заряда, силы тока и напряжения называются электрическими колебаниями. Электрические колебания также являются периодическим процессом, как и механические колебания. Простейшие электрические колебания происходят в цепи, называемой колебательным контуром.

#### Колебательный контур:

Простейшей схемой, при которой могут возникнуть свободные электрические колебания, является конденсатор, а это схема, состоящая из катушки, соединенной с облолочками конденсатора (рис.42.1). Электрическое колебание, которое спонтанно происходит внутри цепи без нашего вмешательства, называется свободным электрическим колебанием. Свободные электрические колебания — это не затухающие колебания. Колебание в колебательном контуре происходит в виде периодического чередования энергий электрического поля и конденсатора и магнитного поля в катушке. При свободных электрических колебаниях энергии электрического поля и магнитного поля совершают колебательное движение, периодически превращаясь друг в друга. Но полная энергия электромагнитного поля, состоящая из суммы этих энергий, сохраняется неизменной.

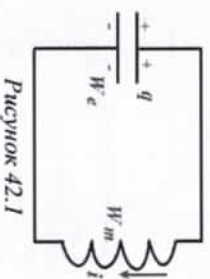


Рисунок 42.1

Если также учитывать сопротивление в проводах схемы, энергия электромагнитного поля будет постепенно уменьшаться со временем, в то время как энергия электромагнитного поля будет преобразована в тепло, нагревая провода. Такая вибрация называется затухающей вибрацией.

Электрические колебания, называемые вынужденными колебаниями, возникают в колебательном контуре, если цепь периодически пополняет энергией электромагнитного поля, уменьшающейся из-за сопротивления, создаваемого зарядом от источника. Но мы ограничимся в этой теме только изучением свободных электрических колебаний.

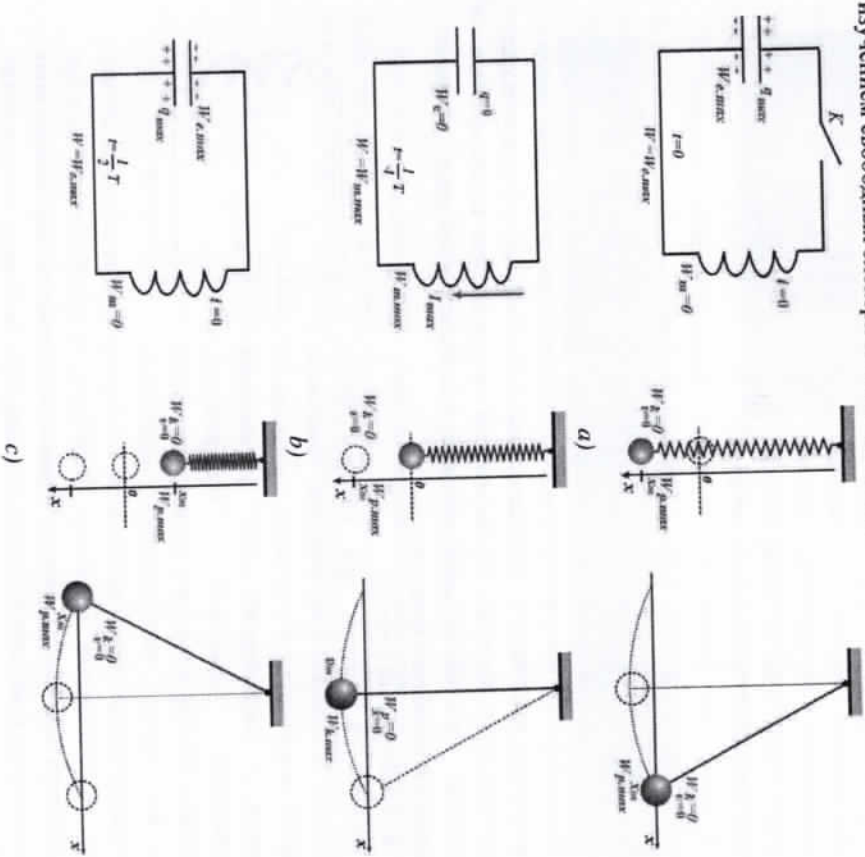


Рисунок 42.2

Существует сходство между колебаниями электрическими и механическими колебаниями. Энергию электрического поля можно сравнить с потенциальной энергией, а энергию магнитного поля с кинетической энергией. Зарядка конденсатор, коммутатор будет иметь максимальную энергию электрического поля при подключении. Это можно сравнить с пружинным маятником с расстойным хм или математическим маятником с максимальным отклонением от положения равновесия. Потому что в этот

момент маятника будут иметь максимальную потенциальную энергию (рис.42.2-а).

При прохождении промежутка  $t = \frac{T}{4}$  времени конденсатор разряжается до полного разряда, при этом сила тока в катушке достигает своего максимального значения. Следовательно, при этом энергия электрического поля равна нулю, а энергия магнитного поля достигает своего максимального значения. Это можно сравнить с моментом перехода маятника из состояния равновесия. Потому что в этот момент потенциальная энергия становится равной нулю, а кинетическая энергия и скорость достигают своего максимального значения (рис.42.2-б).

Через некоторое время  $t = \frac{T}{2}$  конденсатор снова полностью заряжается, но теперь крышки остаются заряженными с противоположными жестом. При этом сила тока на катушке становится равной нулю. Следовательно, при этом энергия магнитного поля равна нулю, а энергия электрического поля достигает своего максимального значения. Это можно сравнить с моментом максимального смещения маятника в сторону, противоположную положению равновесия. Поскольку в этот момент кинетическая энергия становится равной нулю, потенциальная энергия достигает своего максимального значения (рис.42.2-с).

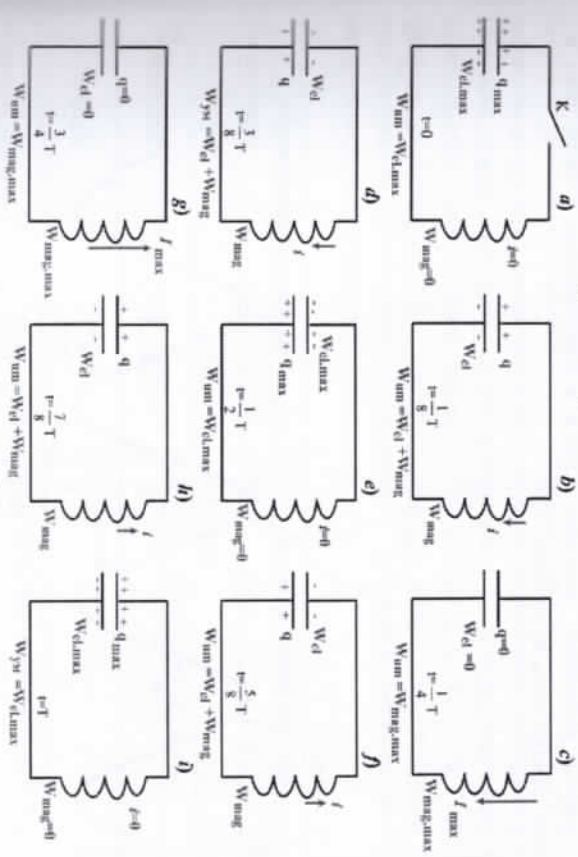


Рисунок 42.3

На рисунке 42.3 ниже описан процесс однократного полного колебания в колебательном контуре, изменения заряда, силы тока, а также энергии электрического и магнитного полей в коле. Из этого рисунка видно, что при уменьшении количества заряда в конденсаторе сила тока в катушке увеличивается, и наоборот, при увеличении количества заряда сила тока уменьшается. Другими словами, в колебательном контуре сила тока в свободном колебательном контуре опережает заряд по фазе до  $\pi/2$ .

Поскольку конденсатор, который сначала был полностью заряжен в момент наблюдения, подключен к катушке, уравнение зависимости заряда от времени подчиняется закону косинусов, то есть  $q = q_m \cos \omega t$ . Так как сила тока равна произведению первого порядка, полученному по времени от заряда  $i = \frac{dq}{dt} = -q_m \omega \sin \omega t = I_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$ . Отсюда следует, что разность между фазами колебаний заряда и силы тока равна  $\pi/2$ .

Уравнения зависимости величины заряда в конденсаторе колебательного контура и силы тока в катушке от времени будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} q &= q_m \cos \omega t \\ I &= -q_m \omega \sin \omega t = I_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \quad (42.1)$$

Графики колебаний величины заряда в конденсаторе и силы тока в катушке изображены на рисунке 42.4.

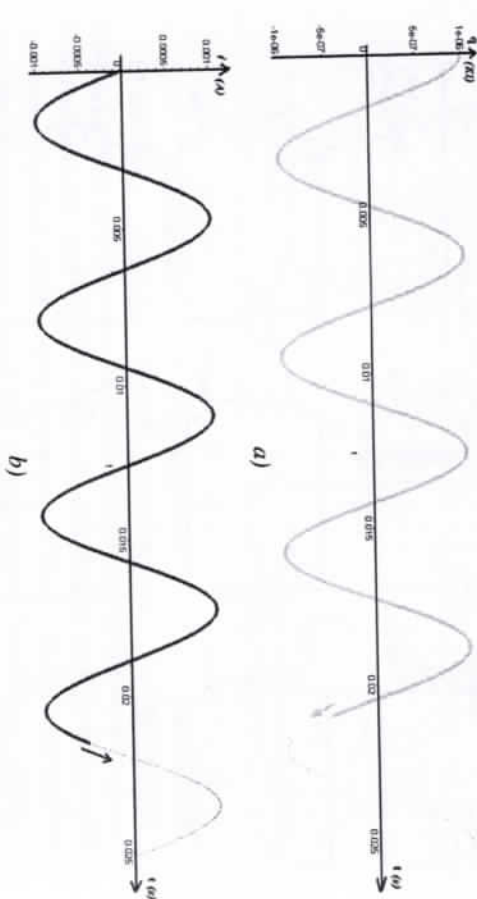


Рисунок 42.4

В колебательном контуре уравнения зависимости энергии электрического и магнитного полей от времени будут выглядеть следующим образом:

$$W_E = \frac{q_m^2}{2C} \cos^2 \omega t = W_{Emax} \cos^2 \omega t, \quad W_M = \frac{LI_m^2}{2} \sin^2 \omega t = W_{Mmax} \sin^2 \omega t \quad (42.2)$$

Графики колебаний электрического поля, магнитного поля и полных энергий изображены на рисунке 42.5.

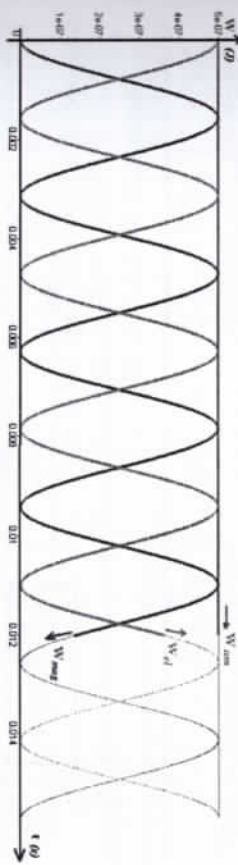


Рисунок 42.5

Как видно из рисунка выше и формул, получается, что частота колебаний энергии будет в два раза больше частоты колебаний силы заряда и тока. Другими словами, поскольку энергии электрического и магнитного полей колеблется дважды, когда сила заряда и тока колеблется один раз.

**Сходство механических и электрических колебаний:**

В механических колебаниях механические величины (координатная, скорость, ускорение, кинетическая и потенциальная энергии) периодически меняются во времени, тогда как в электрических колебаниях электрические величины (заряд, сила тока, скорость изменения силы тока, магнитное и электрическое поле энергии) периодически меняются во времени. Таким образом, оказывается, что существует сходство между механическими и электрическими колебаниями. В таблице 1 приведена аналогия между механической и электрической величинами.

Таблица 41.1

Механические размеры		Электрические размеры	
Координаты	$x$	Заряд	$q$
Скорость	$v$	Сила тока	$i$
Ускорение	$a_x$	Скорость изменения силы тока	$i'$
Масса	$m$	Индуктивность	$L$
Жесткость пружин	$k$	Величина, обратная емкости	$\frac{1}{C}$

Потенциальная энергия	$\frac{kx^2}{2}$	Энергия электрического поля	$\frac{q^2}{2C}$
Кинетическая энергия	$\frac{mv^2}{2}$	Энергия магнитного поля	$\frac{LI^2}{2}$
Зависимость производной второго порядка от координаты	$x'' = -\frac{k}{m}x$	Зависимость производной второго порядка от заряда от заряда	$q'' = -\frac{1}{L \cdot C}q$
Частота собственных колебаний пружины	$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$	Частота собственных колебаний контура	$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$
Период колебаний пружины	$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$	Период колебаний контура	$T = 2\pi\sqrt{LC}$
Частота колебаний пружины	$\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$	Частота колебаний контура	$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

**Формула Томсона:**

В колебательном контуре энергия электрического поля в конденсаторе и энергия магнитного поля в катушке совершает периодические колебания, превращаясь друг в друга. Однако полная энергия, состоящая из суммы энергий электрического и магнитного полей, остается неизменной в любой момент времени. Следовательно, производная от полной энергии по времени будет равна нулю.

$$W_{\text{полн}} = \frac{q_{\text{max}}^2}{2C} = \frac{LI_{\text{max}}^2}{2} = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2}, \rightarrow W'_{\text{полн}} = 0, \rightarrow \left( \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} \right)' = 0, \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{1}{2C} 2q q' + \frac{L}{2} 2I I' = 0, \rightarrow \frac{q}{C} i + Li i' = 0, \rightarrow \frac{q}{C} i + i i' = 0, \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{q}{C} + Li q'' = 0, \rightarrow q'' = -\frac{1}{LC} q.$$

Следовательно, производная второго порядка от заряда по времени снова будет зависеть от заряда. Это можно сравнить с уравнением в механике  $x'' = -\frac{k}{m}x$ . Следовательно, в механике изменение заряда во времени так же, как и координаты, подчиняется закону синуса или Косинуса.

$$q = q_{\text{max}} \cos \omega t, \rightarrow q' = i = -q_{\text{max}} \omega \sin \omega t, \rightarrow q'' = i' = -q_{\text{max}} \omega^2 \cos \omega t = -\omega^2 q$$

Отсюда следует, что для производной второго порядка от заряда существуют две  $q'' = -\omega^2 q$  и  $q'' = -\frac{1}{LC} q$  похожие формулы. Из этого  $\omega^2 = \frac{1}{LC}$

или  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  следует формула для нахождения циклической частоты колебательного контура. Частота колебаний колебательного контура определяется по формуле  $\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  период колебаний контура  $T = \frac{1}{\nu} = 2\pi\sqrt{LC}$ .

Таким образом, в колебательном контуре циклическая частота, частота колебаний и период колебаний имеют вид:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}, \quad \nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (42.2)$$

Формула нахождения периода электрических колебаний в колебательном контуре также называется формулой Томсона.

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

Из приведенных выше формул видно, что при увеличении емкости или индуктивности период колебаний увеличивается, а частота колебаний уменьшается.

**Вопросы по теме:**

1. Что называют электрическими колебаниями?
2. Что такое колебательный контур? Как в нем колеблются заряд и сила тока? Какова их разность фаз?
3. Как энергия колеблется в колебательном контуре? Во сколько раз отличаются колебания энергии и колебания заряда?
4. Для колебательного контура запишите циклическую частоту и частоту колебаний. Запишите формулу Томсона.
5. Какие величины координат, скорости, ускорения в механике аналогичны электрическим величинам?
6. Какие электрические величины аналогичны величинам массы, импульса, цилиндра в механике?

**Решение задачи:**

1. Изменение напряжения на конденсаторе колебательного контура задается уравнением  $u = 10 \cos(2 \cdot 10^3 \pi t)$  (В). Емкость конденсатора составляет  $2,6 \cdot 10^{-2}$  мкФ. Какое максимальное значение энергии магнитного поля в контуре (Дж)?

- A)  $2,6 \cdot 10^{-6}$     B)  $0,65 \cdot 10^{-6}$     C)  $1,3 \cdot 10^{-6}$     D)  $2,6 \cdot 10^{-4}$

**Дано:**  
 $u = 10 \cos(2 \cdot 10^3 \pi t)$   
 $C = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ мкФ}$   
 $W_M = ?$

**Решение:**  
 Максимальное значение энергии электрического поля равно максимальному значению энергии магнитного поля.

$$W_M = W_E = \frac{Cu_0^2}{2}, \rightarrow U = U_0 \cos(\omega t)$$

$$U_0 = 10 \text{ В}$$

$$W_M = \frac{2,6 \cdot 10^{-8} \cdot 10^2}{2} = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}$$

**Ответ:** С)

2. Закон изменения заряда в контуре колебаний имеет вид  $q = \sin 10t$  (Кл). Найдите амплитуду колебаний силы тока (А).

**Дано:**  $q = \sin 10t$   
 $I_0 = ?$

**Решение:** Производная первого порядка, полученная по времени из уравнения изменения заряда, дает уравнение изменения силы тока.

$$i = \frac{dq}{dt} = 10 \cos 10t \Rightarrow I_0 = 10 \text{ А}$$

**Ответ:** 10 А

**§ 43. АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И СРЕДНЯЯ МОЩНОСТЬ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.**

**Активное сопротивление в цепи переменного тока:**

В 18 веке мы познакомились с законом электромагнитной индукции и его различными применениями. Мы также были знакомы с тем, что индукция, возникающая в вращающейся проводочной раме в магнитном поле, имеет вид уравнения зависимости ЭДС от времени. Далее мы называем проводочную раму или катушку, вращающуюся в магнитном поле, источником переменного тока. В качестве примера можно привести различные генераторы, ГЭС, ТЭС и АЭС. При передаче электрической энергии от источника к потребителю ее усиливают и понижают в несколько раз с помощью трансформаторов. Какая-то часть электроэнергии тратится вступая из-за сопротивления линейных проводов на линиях. Поэтому обозначим ток часть индукционного ЭДС в источнике тока  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{max}} \sin \omega t$ , которая дошла до потребителя и  $= U_{\text{max}} \sin \omega t$ . Так как обычный переменный ток с частотой 50 Гц является квазистационарным (аналогично стационарному) током, то напряжение на источнике тока и потребителе будет колебаться в одной фазе, а частота при этом сохраняется неизменной. Потребитель, подключенный к источнику переменного тока, далее будем

называть активным сопротивлением. Давайте проверим, колеблется ли ток и напряжение в активном сопротивлении в одной фазе.

В источнике тока по закону электромагнитной индукции  $\mathcal{E} = -\dot{\Phi} = -(NBS \cos \omega t) = NBS \omega \sin \omega t = \mathcal{E}_{\text{max}} \sin \omega t$

индукция, равная ЭДС генерируется. Обозначим его напряжением, которое достигает потребителя (активное сопротивление) от ЭДС  $u = U_{\text{max}} \sin \omega t$ . Сила тока в активном сопротивлении равно:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_{\text{max}} \sin \omega t}{R} = I_{\text{max}} \sin \omega t$$

Следовательно, уравнение зависимости напряжения и силы тока во времени при подключении активного сопротивления к источнику переменного тока будет иметь вид (рис. 42.1):

$$\boxed{u = U_{\text{max}} \sin \omega t}$$

$$\boxed{i = I_{\text{max}} \sin \omega t} \quad (43.1)$$

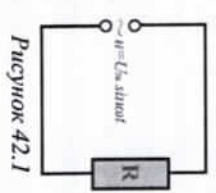


Рисунок 42.1

Амплитудное значение силы тока будет:

$$\boxed{I_{\text{max}} = \frac{U_{\text{max}}}{R}} \quad (43.2)$$

Графики зависимости напряжения и силы тока во времени при подключении активного сопротивления к переменному току изображены на рисунке ниже.

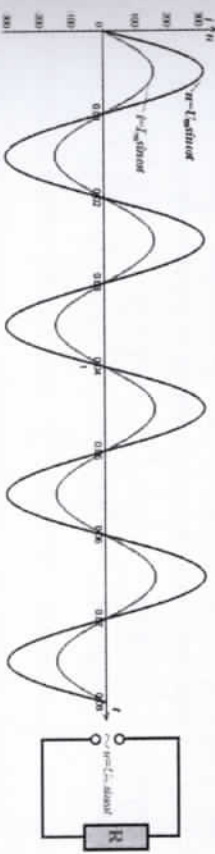


Рисунок 42.2

Как видно из рисунка, сила тока и напряжение равны нулю одновременно, достигая максимума или минимума одновременно, то есть они колеблются в одной и той же фазе.

При подключении активного сопротивления к цепи переменного тока разность фаз колебаний силы тока и напряжения в цепи будет равна нулю.

**Средняя мощность в цепи переменного тока:**

С законом Джоуля-Ленца мы познакомились в главе 1 для определения мощности и работы для цепи постоянного тока. Теперь нас интересует

мощность или работа для цепи переменного тока. При подключении активного сопротивления к цепи переменного тока значения силы тока  $i = I_{\max} \sin \omega t$  и  $u = U_{\max} \sin \omega t$  напряжения в этом сопротивлении изменяются и изменяются каждый момент времени по закону. Если напряжение изменяется с частотой  $\nu = 50 \text{ Гц}$ , значение мощности в любой момент времени также изменяется с интенсивностью. Если в какой-то момент времени мощность  $p = iu = 0$ , она снова будет равна в какой-то момент времени  $p = iu = I_{\max} U_{\max}$ . Нам интересно не мгновенное значение мощности, а ее среднее значение за период. Другими словами, в течение периода активного сопротивления может поглощать столько энергии, то есть сколько оно потребляет от источника тока.

Мы познакомились с тем, что мощность постоянного тока в электрической цепи определяется по формулам  $P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$ . Аналогичную формулу введем и для средней мощности переменного тока за период  $\bar{p} = \bar{i} \bar{u} = \bar{I}^2 R = \frac{\bar{u}^2}{R}$ . Где:  $\bar{p}$  — среднее значение переменного тока за период,  $\bar{i}$  и  $\bar{u}$  — средние значения силы переменного тока и напряжения за период.

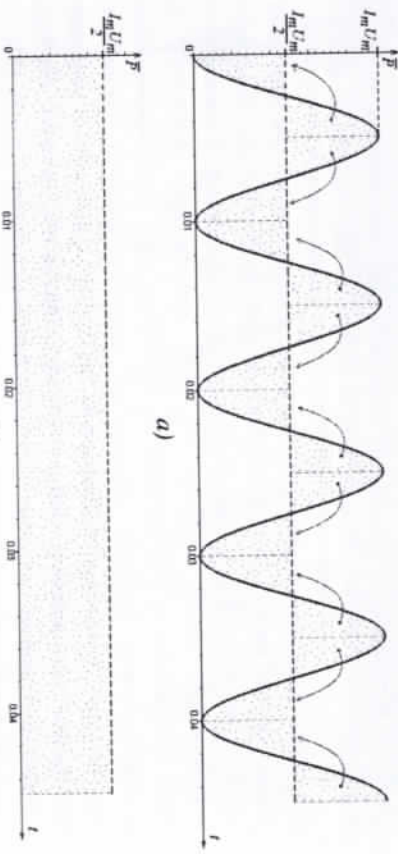


Рисунок 43.3

Определим среднюю мощность переменного тока за период.

$$p = iu = I_{\max} \sin \omega t \cdot U_{\max} \sin \omega t = I_{\max} U_{\max} \sin^2 \omega t = I_{\max} U_{\max} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} = \frac{I_{\max} U_{\max}}{2} - \frac{I_{\max} U_{\max}}{2} \cos 2\omega t = \frac{I_{\max} U_{\max}}{2} - \bar{p}$$

Из полученной формулы  $\bar{p} = \frac{I_{\max} U_{\max}}{2} - \frac{I_{\max} U_{\max}}{2} \cos 2\omega t$  среднее значение второго члена уравнения  $\frac{I_{\max} U_{\max}}{2} \cos 2\omega t$  за период будет равно нулю. В этом также можно убедиться, посмотрев на рисунок 43.3-а ниже. В результате получаем результат для средней мощности переменного тока за период  $\bar{p} = \frac{I_{\max} U_{\max}}{2}$  (рис.43.3-б).

Выше мы получили результат для среднего значения переменного тока за период  $\bar{p} = \frac{I_{\max} U_{\max}}{2}$ . Закон Ома  $I_{\max} = \frac{U_{\max}}{R}$  будет в соответствии с  $\bar{p} = \frac{I_{\max} U_{\max}}{2} = \frac{U_{\max}^2}{2R}$  или  $U_{\max} = I_{\max} R$  в соответствии с  $\bar{p} = \frac{I_{\max} U_{\max}}{2} = \frac{I_{\max}^2 R}{2}$ . Отсюда и получаем результат  $\bar{p} = \frac{I_{\max} U_{\max}}{2} = \frac{I_{\max}^2 R}{2} = \frac{U_{\max}^2}{2R}$ .

Следовательно, выражение средней мощности в цепи переменного тока через максимальные значения силы тока и напряжения будет выглядеть следующим образом:

$$\bar{p} = \frac{I_{\max} U_{\max}}{2} = \frac{I_{\max}^2 R}{2} = \frac{U_{\max}^2}{2R} \quad (43.3)$$

Квадратный корень из квадрата среднего значения силы тока за период называется действительным значением силы тока.

Для источника переменного тока средняя мощность за период равна  $\bar{p} = \bar{I}^2 R$ . С другой стороны, если мы используем для силы тока  $i = I_{\max} \sin \omega t$ , мы получим результат для средней мощности  $\bar{p} = I_{\max}^2 R \sin^2 \omega t = \frac{I_{\max}^2 R}{2} - \frac{I_{\max}^2 R}{2} \cos 2\omega t = \frac{I_{\max}^2 R}{2}$ . Следовательно, оказывается, что средняя мощность за период равна  $\bar{p} = \bar{I}^2 R = \frac{I_{\max}^2 R}{2}$ . Из этого следует  $\bar{I}^2 = \frac{I_{\max}^2}{2}$ , что, если взять квадратный корень с обеих сторон выражения, образуется  $\sqrt{\bar{I}^2} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} = I$ .

Следовательно, действующее (или эффективное) значение силы тока будет:

$$I = \sqrt{\bar{I}^2} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (43.4)$$

Квадратный корень из квадрата среднего значения напряжения за период называется действительным значением напряжения.

Для источника переменного тока средняя мощность за период равна  $\bar{p} = \frac{U_{\max}^2}{2R}$ . С другой стороны, если мы используем для силы тока  $u = U_{\max} \sin \omega t$ , мы

получим результат для средней мощности  $\bar{P} = \frac{U_m^2}{R} \sin^2 \omega t = \frac{U_m^2}{2R} - \frac{U_m^2}{2R} \cos 2\omega t = \frac{U_m^2}{2R}$ .

Следовательно, оказывается, что средняя мощность за период равна  $\bar{P} = \frac{U_m^2}{2R} = \frac{U^2}{R}$ . Из этого следует  $U^2 = \frac{U_m^2}{2}$ , что если взять квадратный корень с

обеих сторон выражения, образуется  $\sqrt{U^2} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = U$ .

Следовательно, действующее (или эффективное) значение напряжения будет:

$$U = \sqrt{U^2} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (43.5)$$

Выражение средней мощности в цепи переменного тока через действующие значения силы тока и напряжения будет выглядеть следующим образом:

$$\bar{P} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (43.6)$$

Таким образом, получается, что мощность, выделяемая потребителем R при подключении к источнику переменного напряжения U, и мощность, выделяемая при подключении к источнику переменного напряжения, значение которого равно  $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ . Напряжение  $U = 220$  В, которое мы

используем в нашем доме, является действительным значением переменного напряжения, а его максимальное значение равно  $U_{\max} = \sqrt{2}U \approx 310$  В. При напряжении  $v = 50$  Гц значения  $-310$  В,  $0$  В,  $+310$  В резко меняются. При подключении к нему какого-либо активного сопротивления — потребителя, на него действует такая мощность, как неизменное напряжение  $220$  В.

**Вопросы по теме:**

1. Что называется активным сопротивлением?
2. Напишите уравнения зависимости силы тока и напряжения от времени при подключении активного сопротивления к цепи переменного тока.
3. Запишите формулы средней мощности за период, когда активное сопротивление подключено к цепи переменного тока.
4. Какова действительная величина силы тока? Запишите его формулу.
5. Каково действующее значение напряжения? Запишите его формулу.
6. Какие еще термин, можно использовать вместо термина "значение влияния"?
7. В хозяйственной сети используется напряжение  $220$  В. Чему равно максимальное значение этого напряжения?

**Решение задачи:**

1. Какова значения период и частота, если циклическая частота переменного тока равна  $1000 \pi$  рад/с?
  - А)  $0,005$  с;  $200$  Гц
  - В)  $0,002$  с;  $500$  Гц
  - С)  $0,02$  с;  $50$  Гц
  - Д)  $0,001$  с;  $1000$  Гц

**Дано:**  $\omega = 1000 \pi$  рад/с  
**Решение:** Циклическая частота связана с периодом и частотой следующим образом:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{1000\pi} = 0,002 \text{ с}; \quad \nu = \frac{1}{T} = 500 \text{ Гц}$$

**Ответ:** В)  $0,002$  с;  $500$  Гц.

1. Ротор генератора ГЭС вращается с частотой  $125$  об/мин. При скольких парах полюсов образуется переменный ток частотой  $50$  Гц?

**Дано:**  $\nu = 125$  об/мин  
 $v = 50$  Гц  
 $N = ?$

**Решение:** Ротор должен вращаться  $50$  раз в секунду, чтобы возник электрический ток частотой  $50$  Гц, если генератор имеет пару магнитных полюсов. Если число полюсов равно  $N$ , то ротор генератора должен вращаться с частотой  $\nu_n$ , возникает  $\nu$  переменного тока.

$$\nu_n = \frac{\nu}{N}; \quad N = \frac{\nu}{\nu_n} \rightarrow N = \frac{50 \cdot 60 \cdot 12}{25} = 24$$

**Ответ:**  $N = 24$  пар полюсов

**§ 44. КОНДЕНСАТОР И КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.**

**Конденсатор в цепи переменного тока:**

Собираем цепочку, как на рисунке 44.1. В нашем распоряжении находятся источники постоянного и переменного тока, пусть ЭДС источника постоянного тока равен действующему значению переменного напряжения. Давайте сначала подключим конденсатор к источнику постоянного тока, а затем к источнику переменного тока.

а) Лампочка не загорается, если мы сначала подключаем конденсатор к источнику постоянного тока. Потому что, обложки конденсатора разделены диэлектриком, то есть цепь отсоединена. Дело в том, что при зарядке конденсатора ток проходит через волокно лампы за меньшее время, чем миллисекунда. В это время волокно лампы не успевает выплавляться, даже если оно немного выплавляется, мы этого не замечаем. В течение очень

короткого времени конденсатор будет заряжаться, а затем прохождение тока по цепи прекратится.

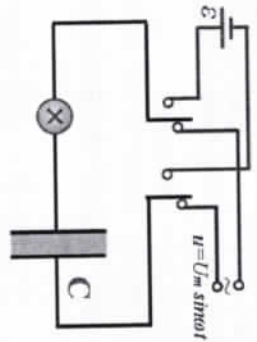
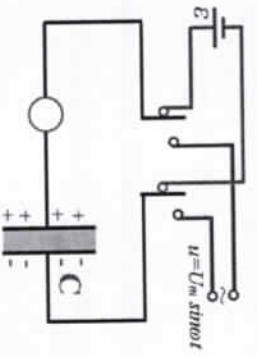


Рисунок 44.1

б) Теперь, когда мы подключаем конденсатор к цепи переменного тока, лампа загорается тускло. Чем больше мы увеличиваем емкость конденсатора, тем больше увеличивается разрывание лампы. Как на самом деле получается, если цепочка — это кольцо?

— Поскольку напряжение является переменным, обложки конденсатора периодически заряжаются и разряжаются. Во время перезарядки ток проходит через волокна лампы, и когда волокно нагревается, лампа нагревается. Но никогда ток не проходит от одной обложки конденсатора к другой. Остается только заряжаться и разряжаться.

Источник тока, генерирующий переменное напряжение (ГЭС, АЭС, ТЭС и т. д.) в то время как ЭДС изменяется в соответствии с законом  $\varepsilon = \varepsilon_{\max} \sin \omega t$ , у потребителей он изменяется в соответствии с тем же законом. Переменный ток может быть усилен или ослаблен за счет трансформаторов несколько раз при передаче от источника тока к потребителем. Но при этом частота и фаза колебаний электрической величины не меняются. Поэтому можно сказать, что напряжение на потребителях изменяется по закону  $u = U_{\max} \sin \omega t$ . Тогда заряд в обложках конденсатора будет меняться по закону.

$$q = C u = C U_{\max} \sin \omega t$$

А сила тока равна производной первого порядка от заряда по времени. Следовательно, сила тока зависит от времени меняется в соответствии с законом.

$$i = q' = C u' = C U_{\max} \omega \cos \omega t = I_{\max} \sin(\omega t + \pi/2)$$

Следовательно, изменение заряда, напряжения и силы тока во времени при подключении конденсатора к источнику переменного тока будет следующим:

$$\begin{cases} U = U_m \sin \omega t \\ q = C U_m \sin \omega t \\ i = q' = C U_m \omega \sin(\omega t + \pi/2) \end{cases} \quad (44.1)$$

Зависимость амплитудных значений напряжения и емкостного сопротивления от силы тока имеет вид:

$$I_{\max} = \omega C U_{\max} = \frac{U_{\max}}{X_c}, \quad X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (44.2)$$

Из приведенной выше формулы также видно, что значение емкостного сопротивления, обратно пропорционально емкости конденсатора и частоте тока. Следовательно, сопротивление конденсатора постоянному току бесконечно велико, в то время как его воздействие на переменный ток будет иметь конечное значение  $X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi\nu C}$ . Другими словами, на рис. 44.1-б

показано, что при увеличении частоты переменного тока или емкости конденсатора увеличивается яркость лампы.

А графики зависимости силы тока и напряжения от времени представлены на рисунке ниже:

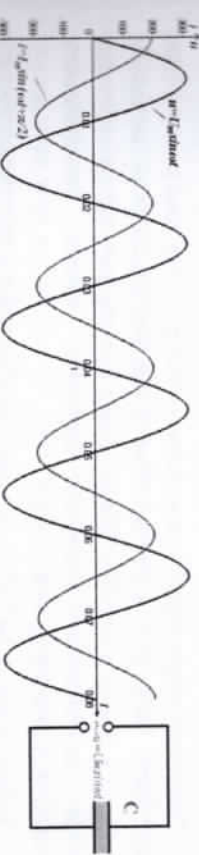


Рисунок 44.2

Как видно из рисунка выше, сила тока и напряжения не колеблются в одной фазе.

При подключении конденсатора к цепи переменного тока фазы колебаний сила тока опережает фазу колебаний напряжения на  $\pi/2$ .

Это означает, что в тот момент, когда конденсатор начинает заряжаться, сила тока будет наибольшей, а напряжение — нулевым. Когда напряжение достигает наибольшего значения, сила тока остается равной нулю и т. д.

**Индуктивная катушка в цепи переменного тока:**

Собираем цепочку, как на рисунке 44.3. В нашем распоряжении накопится источник постоянного и переменного тока, пусть ЭДС источника постоянного тока равен действующему значению переменного напряжения. Давайте сначала подключим конденсатор к источнику постоянного тока, а затем к источнику переменного тока.



а) Если мы сначала подключим катушку к источнику постоянного тока, лампочка начнет светиться ровно через некоторое время. Причина — явление самоиндукции. Теперь, когда мы снова подключим катушку к источнику переменного тока с увеличенной индуктивностью, лампа будет гореть точно так же, как и раньше, только с увеличением времени зарядки.

б) Теперь, когда мы подключаем катушку к источнику переменного тока, она будет мигать тусклее, чем при подключении к источнику переменного тока. Если индуктивность катушки будет увеличиваться, затемнение лампы будет еще больше увеличиваться. Почему при подключении к переменному току лампа загорается тусклее?

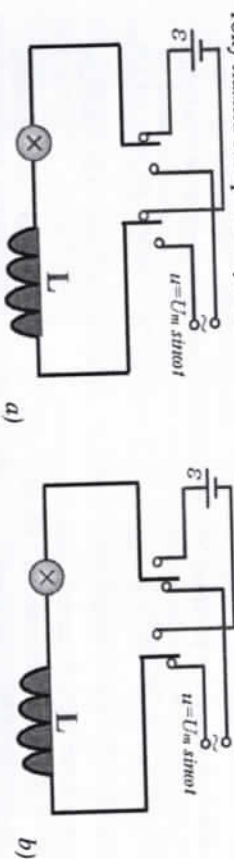


Рисунок 44.3

— Поскольку переменный ток изменяется быстро, сила тока в катушке не может быть достигнута в соответствии с каждым мгновенным значением силы тока в самом источнике, она не может сделать шаг, соответствующий каждому мгновенному значению. Другими словами, пронизываемость ограничивает амплитуду силы тока.

С увеличением силы тока в катушке увеличивается и магнитный поток в ней. Согласно правилу Ленца, это увеличивающееся магнитное поле вызывает индукционный ток в самой катушке. Направление индукционного тока противоположно направлению основного тока. По этой причине напряжение и индукционный ЭДС связаны обратным знаком.

$$u = -\mathcal{E}_{\text{индукция}} = -(-\Phi') = \Phi' = (Li)' = (L I_{\text{max}} \sin \omega t)' = L I_{\text{max}} \omega \cos \omega t = \omega L I_{\text{max}} \sin(\omega t + \pi/2) = U_{\text{max}} \sin(\omega t + \pi/2)$$

Следовательно, при подключении катушки к цепи переменного тока законы изменения силы тока и напряжения во времени остаются неизменными:

$$\begin{cases} u = \omega L I_{\text{max}} \sin(\omega t + \pi/2) = U_{\text{max}} \sin(\omega t + \pi/2) \\ i = I_{\text{max}} \sin \omega t \end{cases} \quad (44.3)$$

Связь между силой тока и амплитудой напряжения и индуктивным сопротивлением будет:

$$I_{\text{max}} = \frac{U_{\text{max}}}{\omega L} = \frac{U_{\text{max}}}{X_L}, \quad X_L = \omega L \quad (44.4)$$

Из приведенной выше формулы также видно, что значение индуктивного сопротивления будет прямо пропорционально индуктивности катушки и частоте тока. Поэтому яркость лампы при подключении катушки к постоянному току будет выше, чем при подключении к переменному току. Чем выше индуктивность, тем меньше сила тока на катушке, т. е. индуктивность ограничивает максимальное значение силы тока (рис. 44.3-б).

А графики зависимости силы тока и напряжения от времени представлены на рисунке ниже:

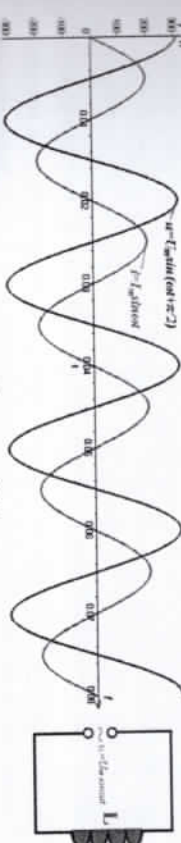


Рисунок 44.4

Как видно из рисунка выше, сила тока и напряжения не колеблются в одной фазе.

При подключении кольца к цепи переменного тока фаза колебаний напряжения опережает фазу колебаний силы тока на  $\pi/2$ .

Индуктивная катушка сопротивляется переменному току. По этой причине сила тока на катушке не достигает каждого мгновенного значения напряжения и отстает по фазе до  $\pi/2$ .

Вопросы по теме:

1. Загорается ли лампа при подключении электрической лампы к сети переменного тока последовательно с конденсатором? Объясните почему.
2. Загорается ли лампа при подключении электрической лампы к сети переменного тока последовательно с конденсатором? Объясните почему.
3. К сети переменного тока последовательно подключается электрическая лампа с конденсатором. Как изменится напряжение в лампе, если электрическая емкость конденсатора при этом увеличится? Объясните почему.
4. К сети переменного тока последовательно подключается электрическая лампа с конденсатором. Как изменится напряжение в лампе, если при этом частота колебаний тока будет увеличена? Объясните почему.
5. К сети переменного тока последовательно подключается электрическая лампа с конденсатором. Если колебания напряжения происходят по закону синуса, то каким будет закон колебаний силы тока в конденсаторе?
6. Напишите формулу емкостного сопротивления. Как это связано с

- частотой и емкостью?
7. К какой сети переменного тока (неизменной или переменной) лампа загорается ярче при последовательном подключении электрической лампы к катушке индуктивности? Объясните почему.
  8. К сети переменного тока последовательно подключается электрическая лампа с индуктивной катушкой. Как изменится напряжение в лампе, если индуктивность катушки при этом будет увеличена? Объясните почему.
  9. К сети переменного тока последовательно подключается электрическая лампа с индуктивной катушкой. Как изменится напряжение в лампе, если при этом частота колебаний тока будет увеличена? Объясните почему.
  10. К сети переменного тока последовательно подключается электрическая лампа с индуктивной катушкой. Если колебания напряжения происходят по закону синуса, то каким будет закон колебаний силы тока на катушке?
  11. Напишите формулу индуктивного сопротивления. Как это связано с частотой и емкостью?

**Решение задачи:**

1. К цепи переменного тока частотой 400 Гц последовательно подключаются два конденсатора емкостью  $C_1 = 200$  пФ и  $C_2 = 500$  пФ. Оцените электрическое сопротивление конденсаторов.

- А) 1,5 МОм    В) 27 МОм    С) 450 КОм    Д) 2,8 МОм

**Дано:**

$\nu = 400$  Гц  
 $C_1 = 200$  пФ  
 $C_2 = 500$  пФ  
 $R_c = ?$

**Решение:**

Сопротивление конденсатора, подключенного к цепи переменного тока

$$R_c = \frac{1}{2\pi\nu C}$$

Так как здесь последовательно соединяются два конденсатора

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \Rightarrow R_c = \frac{1}{2\pi\nu \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}} = \frac{C_1 + C_2}{2\pi\nu C_1 C_2}$$

$$R_c = \frac{2 \cdot 10^{-10} + 5 \cdot 10^{-10}}{2 \cdot 3,14 \cdot 400 \cdot 2 \cdot 10^{-10} \cdot 5 \cdot 10^{-10}} \approx 2,8 \text{ МОм}$$

Ответ: Д) 2,8 МОм.

1. Конденсатор с электрической емкостью 2 мкФ подключен к цепи переменного тока частотой 50 кГц. Каково эффективное значение силы тока, проходящего через цепь, если эффективное значение напряжения составляет 220 В?

**Дано:**  
 $C = 2$  мкФ  
 $\Omega = 50$  Гц  
 $U_{eff} = 220$  В

**Решение:**  
 Сопротивление конденсатора, подключенного к цепи переменного тока

$$R_c = \frac{1}{2\pi\nu C}$$

$I_{eff} = ?$   
 определяется выражением. По закону Ома для части цепи:

$$I_{eff} = \frac{U_{eff}}{R_c} = U_{eff} 2\pi\nu C = 220 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \approx 0,14 \text{ А}$$

Ответ: 0,14 А

**§ 45. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Как мы видели в предыдущей теме, переменный ток нечувствителен (без инерции) только к активному сопротивлению, в то время как для катушки и конденсатора он имеет некоторый эффект (свойство инерции). Если мы построим электрическую цепь, взяв их не по отдельности, а вместе, то какое явление произойдет в этой смешанной цепи? В этой теме мы познакоимся с Законом Ома и средней мощностью в таких цепях для случая, когда активное сопротивление, емкостное сопротивление и индуктивное сопротивление соединяются вместе (последовательно или параллельно).

**При последовательном соединении:**

Вначале рассмотрим случай, когда активное сопротивление, конденсатор и индуктивная катушка последовательно соединяются в цепи переменного тока.

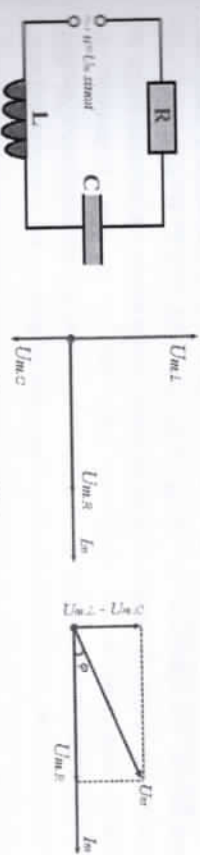


Рисунок 45.1

На рисунке 45.1 изображено последовательное подключение активного сопротивления, конденсатора и индуктивной катушки к цепи переменного тока. Поскольку напряжение и сила тока в каждом из элементов различаются по фазе, мы используем векторную диаграмму для объяснения явления, происходящих в цепи. Поскольку активное сопротивление, конденсатор и индуктивная катушка расположены последовательно, сила тока во всех трех элементах колеблется в одной и той же фазе. Иными словами, в каждом из них сила тока одновременно равна нулю и одновременно достигает

максимум. Следовательно, амплитуда действующее значение и фаза тока в цепи одинаковы в активном сопротивлении, емкостном сопротивлении и индуктивном сопротивлении.

$$I_M = I_{M,R} = I_{M,C} = I_{M,L} \quad \text{или} \quad I = I_R = I_C = I_L \quad (45.1)$$

На векторной диаграмме поместим силу тока на горизонтальную ось.

При последовательном подключении активного сопротивления, конденсатора и катушки к цепи переменного тока амплитудные значения напряжения на сопротивлении, конденсаторе и катушке будут следующими:

$$U_{M,R} = I_M R, \quad U_{M,C} = \frac{I_M}{\omega C}, \quad U_{M,L} = I_M \omega L \quad (45.2)$$

При этом фазы колебаний напряжения на активном сопротивлении, конденсаторе и индуктивной катушке отличаются друг от друга. Другими словами, напряжение на каждом из них одновременно не равно нулю, но не достигает максимума одновременно. Когда один из них равен нулю, другой достигает максимума или минимума.

*Фаза напряжения на конденсаторе отстает от фазы силы тока на  $\pi/2$ , а фаза напряжения на катушке опережает фазу силы тока на  $\pi/2$ .*

Поскольку в активном сопротивлении фазы тока и напряжения одинаковы, сила тока и напряжение расположены на горизонтальной линии, такой как сила тока. Так как напряжение на конденсаторе отстает от силы тока на  $\pi/2$ , то максимальное значение напряжения отклоняется от силы тока на угол  $-\pi/2$  и направляется вертикально вниз. Так как напряжение на индуктивной катушке опережает силу тока на  $\pi/2$ , то максимальное значение напряжения отклоняется от силы тока на угол  $+\pi/2$  и направляется вертикально вверх. В результате колебания напряжения на конденсаторе и катушке изменяются от фазы к фазе на  $\pi$ , и они попадают в противоположную фазу. Если их разность лежит на вертикальном катете прямоугольного треугольника  $U_{M,L}-U_{M,C}$ , то второе — на горизонтальном катете  $U_{M,R}$ . А на диагонали параллелограмма, построенного на этих катетах, лежит результирующее напряжение  $U_M$ .

Максимальное значение напряжения из векторной диаграммы будет следующим.

$$U_M = \sqrt{U_{M,R}^2 + (U_{M,L} - U_{M,C})^2} \quad (45.3)$$

Если обе стороны вышеприведенной формулы разделить на  $\sqrt{2}$ , то получится действующее значение напряжения.

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} \quad (45.4)$$

Если мы представим напряжение в приведенной выше формуле через силу тока  $U_M = \sqrt{U_{M,R}^2 + (U_{M,L} - U_{M,C})^2}$

$$U_M = \sqrt{(I_M R)^2 + \left( I_M \omega L - I_M \frac{1}{\omega C} \right)^2} = I_M \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$$

Получится результат. Отсюда закон Ома для цепи переменного тока имеет вид:

$$I_M = \frac{U_M}{\sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}$$

Если обе части этой формулы разделить на  $\sqrt{2}$ , то закон Ома вытекает из действующих значений, то есть получится следующие выражения:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}$$

Следовательно, закон Ома для цепи переменного тока имеет вид:

$$I_M = \frac{U_M}{\sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} \quad \text{или} \quad I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} \quad (45.5)$$

Из закона Ома

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} = Z$$

для общего сопротивления цепи переменного тока получается выражение:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$$

Если мы используем соотношение катетов на векторной диаграмме, то получается сдвиг фаз между напряжением и силой тока:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_{M,L} - U_{M,C}}{U_{M,R}} = \frac{I_M X_L - I_M X_C}{I_M R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

Следовательно, используя закон Ома для цепи переменного тока и векторную диаграмму на рисунке 44.1, можно определить как общее сопротивление, так и сдвиг фаз между напряжением и силой тока.

$$Z = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (45.6)$$

Из приведенной выше формулы можно сделать следующие выводы:

1) Если  $U_{M.L} > U_{M.C}$  или  $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ , то сдвиг фаз будет  $\varphi > 0$ , т. е. напряжение будет опережать силу тока по фазе;

2) Если  $U_{M.L} < U_{M.C}$  или  $\omega L < \frac{1}{\omega C}$ , то сдвиг фаз будет  $\varphi < 0$ , т. е. напряжение будет отставать от силы тока по фазе;

3) Если  $U_{M.L} = U_{M.C}$  или  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ , то сдвиг фаз будет  $\varphi = 0$ , т. е. напряжение и сила тока будут колебаться в одной фазе. Это явление называется резонансным явлением, при котором суммарное сопротивление цепи переменного тока достигает минимального значения  $Z=R$ , а сила тока достигает максимального значения  $I = \frac{U}{R}$ .

Остановимся поочередно на том, как будет выглядеть общее сопротивление, сдвиг фаз и векторная диаграмма, если когда только один из активного сопротивления, конденсатора и индуктивной катушки подключены последовательно

Активное сопротивление, подключенное последовательно к цепи переменного тока, и общее сопротивление для конденсатора, а также сдвиг фаз будут следующими:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

$$t g \varphi = -\frac{1}{R \omega C}$$

(45.7)

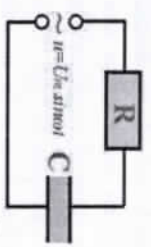
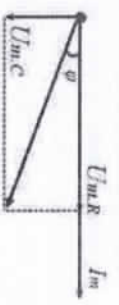


Рисунок 45.2



Как видно из приведенной выше формулы и рисунка 45.2, при последовательном соединении активного сопротивления и конденсатора всегда будет  $\varphi < 0$ , т. е. напряжение будет отставать от силы тока по фазе.

Активное сопротивление, последовательно подключенное к цепи переменного тока, и общее сопротивление для индуктивной катушки, а также сдвиг фаз будут следующими (рис. 45.3):

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$t g \varphi = \frac{\omega L}{R}$$

(45.8)



Рисунок 44.3



Как видно из приведенной выше формулы и рисунка, при последовательном соединении активного сопротивления и индуктивной

катушки всегда будет  $\varphi > 0$ , то есть напряжение будет опережать силу тока по фазе.

Для конденсатора и катушки индуктивности, последовательно соединенных в цепи переменного тока, общее сопротивление, а также сдвиг фаз будут следующими (рис. 45.4):

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$t g \varphi = \pm 90^\circ$$

(45.9)



Рисунок 44.4



Как видно из приведенной выше формулы и рисунка, при последовательном соединении конденсатора и катушки индуктивности получается,  $\varphi = \pm 90^\circ$  что всегда. Если  $U_{M.L} > U_{M.C}$  или  $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ , то происходит сдвиг фаз  $\varphi = +90^\circ$ , и колебания напряжения опережают силу тока по фазе. Если  $U_{M.L} < U_{M.C}$  или  $\omega L < \frac{1}{\omega C}$ , то есть сдвиг фаз, и колебания напряжения отстают от силы тока по фазе.

**При параллельном соединении:**

Теперь рассмотрим случай, когда активное сопротивление, конденсатор и индуктивная катушка параллельно подключены к цепи переменного тока.

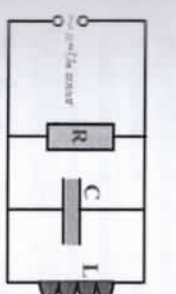
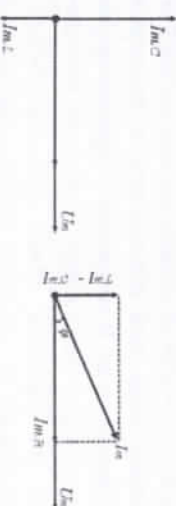


Рисунок 45.5



На рисунке 45.5 изображено, что активное сопротивление, конденсатор и индуктивная катушка соединены параллельно в цепи переменного тока. Поскольку напряжение и сила тока в каждом из элементов различаются по фазе, мы используем векторную диаграмму для объяснения явления, происходящих в цепи. Поскольку активное сопротивление, конденсатор и индуктивная катушка параллельны, напряжение на всех трех элементах колеблется в одной и той же фазе. Иными словами, напряжение на каждом из них одновременно равно нулю, достигая при этом максимума. Следовательно, амплитуда, действующие значения и фаза напряжения в цепи

однаковы в активном сопротивлении, емкостном сопротивлении и индуктивном сопротивлении.

$$U_M = U_{M,R} = U_{M,C} = U_{M,L} \quad \text{и} \quad U = U_R = U_C = U_L \quad (45.10)$$

На векторной диаграмме разместим напряжение на горизонтальной оси. При параллельном подключении активного сопротивления, конденсатора и катушки к цепи переменного тока амплитудные значения силы тока в сопротивлении, конденсаторе и катушке будут следующими:

$$I_{M,R} = \frac{U_M}{R}, \quad I_{M,C} = U_M \omega C, \quad I_{M,L} = \frac{U_M}{\omega L} \quad (45.11)$$

При этом фазы колебаний силы тока в активном сопротивлении, конденсаторе и индуктивной катушке отпадают друг от друга. Иными словами, в каждом из них сила тока одновременно равна нулю и не достигает максимума одновременно. Когда один из них равен нулю, другой достигает максимума или минимума.

*Фаза силы тока в конденсаторе опережает фазу напряжения на  $\pi/2$ , а фаза силы тока в катушке отстает от фазы напряжения на  $\pi/2$ .*

Поскольку в активном сопротивлении фазы напряжения и силы тока одинаковы, сила тока и напряжение расположены на горизонтальной линии, такой как сила тока. Поскольку сила тока в конденсаторе опережает напряжение на  $\pi/2$ , максимальное значение силы тока отклоняется от напряжения на угол  $+\pi/2$  и направляется вертикально вверх. Так как сила тока на индуктивной катушке отстает от напряжения на  $\pi/2$ , то максимальное значение силы тока отклоняется от напряжения на  $-\pi/2$  и направляется вертикально вниз. В результате колебания сил тока в конденсаторе и катушке изменяются от фазы к фазе на  $\pi$ , и они попадают в противоположную фазу. Если их разность лежит на вертикальном катете прямоугольного треугольника  $I_{M,L} - I_{M,C}$ , то второе — на горизонтальном катете  $I_{M,R}$ . А на диагонали параллелограмма, построенного на этих катетах, лежит результирующее напряжение  $I_M$ . Максимальное значение напряжения из векторной диаграммы будет следующим.

$$I_M = \sqrt{I_{M,R}^2 + (I_{M,C} - I_{M,L})^2} \quad (45.12)$$

Если обе стороны вышеприведенной формулы разделить на  $\sqrt{2}$ , то получится действующее значение силы тока.

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2} \quad (45.12a)$$

Выражая силы тока в приведенной выше формуле через напряжения, тогда

$$I_M = \sqrt{I_{M,R}^2 + (I_{M,L} - I_{M,C})^2}$$

если выразить силы тока через напряжения в формуле, то получается

$$I_M = \sqrt{\left(\frac{U_{M,R}}{R}\right)^2 + \left(U_{M,C} \omega C - \frac{U_{M,L}}{\omega L}\right)^2} = U_M \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}$$

закон Ома для цепи переменного тока имеет следующий вид:

$$I_M = U_M \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}$$

Если обе стороны этой формулы разделить на  $\sqrt{2}$ , то закон Ома вытекает из действующих значений, то есть

$$I = U \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}$$

Таким образом, закон Ома для цепи переменного тока будет следующим:

$$I_M = U_M \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2} \quad \text{или} \quad I = U \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2} \quad (45.13)$$

Используя закон Ома для цепи переменного тока и векторную диаграмму на рисунке 45.5, можно определить как общее сопротивление, так и сдвиг фаз между напряжением и силой тока. Из закона Ома выше

$$I = U \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2} = \frac{U}{Z}$$

для общего сопротивления цепи переменного тока получается выражение:

$$\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}$$

Если мы используем соотношение катетов на векторной диаграмме, то получаем выражение для сдвига фаз в следующем виде:

$$\text{tg} \varphi = \frac{I_{M,C} - I_{M,L}}{I_{M,R}} = \frac{X_C - X_L}{R} = \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) R$$

Отсюда общее сопротивление и сдвиг фаз имеют следующий вид:

$$\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}, \quad \text{tg} \varphi = \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) R \quad (45.14)$$

Из приведенной выше формулы можно сделать следующие выводы:

1) Если  $I_{M,C} > I_{M,L}$  или  $\omega C > \frac{1}{\omega L}$ , то будет сдвиг фаз  $\varphi > 0$ , т. е. сила тока будет опережать напряжение по фазе;

2) Если  $I_{M,C} < I_{M,L}$  или  $\omega C < \frac{1}{\omega L}$ , то будет сдвиг фаз  $\varphi < 0$ , т. е. сила тока будет отставать от напряжения по фазе;

3) Если  $I_{M,C} = I_{M,L}$  или  $\omega C = \frac{1}{\omega L}$ , то произойдет сдвиг фаз  $\varphi = 0$ , то есть сила тока и напряжение будут колебаться в одной фазе. При этом суммарное сопротивление цепи переменного тока будет иметь максимальное значение  $Z = R$ , а сила тока-минимальное  $I = \frac{U}{R}$ .

Остановимся поочередно на том, как будет выглядеть общее сопротивление, сдвиг фаз и векторная диаграмма, если параллельно подключить к цепи переменного тока только один из активных катушек сопротивления, конденсатора и индуктивности.

Для активного сопротивления и конденсатора, подключенного параллельно цепи переменного тока общее сопротивление и сдвиг фаз будут следующими (рис. 45.6):

$$Z = \frac{R}{\sqrt{1 + (R\omega C)^2}}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = R\omega C$$

(45.15)

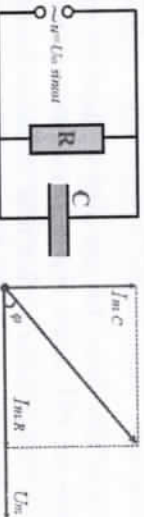


Рисунок 45.6

Как видно из приведенной выше формулы и рисунка, при параллельном соединении активного сопротивления и конденсатора, всегда равно  $\varphi > 0$ , т. е. сила тока опережает напряжение по фазе.

Для активного сопротивления и индуктивной катушки, подключенного параллельно цепи переменного тока общее сопротивление и сдвиг фаз будут следующими (рис. 45.7):

$$Z = \frac{R\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R}{\omega L}$$

(45.16)

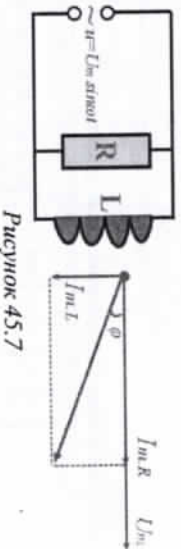


Рисунок 45.7

Как видно из приведенной выше формулы и рисунка, при параллельном соединении активного сопротивления и индуктивной катушки всегда будет  $\varphi < 0$ , т. е. сила тока будет отставать от напряжения по фазе.

Для конденсатора и катушки индуктивности, подключенных параллельно цепи переменного тока, общее сопротивление, а также сдвиг фаз будут следующими:

$$\frac{1}{Z} = \omega C - \frac{1}{\omega L}$$

$$\varphi = \pm 90^\circ$$

(45.17)

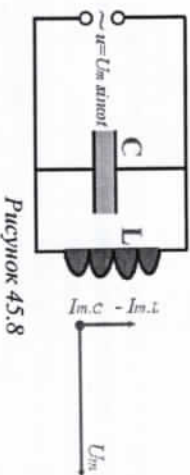


Рисунок 45.8

Как видно из приведенной выше формулы и рисунка, при параллельном соединении конденсатора и катушки индуктивности получается  $\varphi = \pm 90^\circ$ , что всегда. При этом знак выбирается в зависимости от того, насколько большая сила тока на конденсаторе или катушке.

#### Средняя мощность в цепи переменного тока:

Закон Ома для переменных токов мы изучили, ознакомившись в предыдущих темах с различными комбинациями активного сопротивления, конденсатора и индуктивной катушки, соединенных последовательно и параллельно. Теперь нас интересует, какова мощность в этих цепях.

В цепи произвольного переменного тока разность фаз колебаний силы тока и напряжения будет равна  $\varphi$ . Предположим, что сила тока колеблется по закону  $i = I_m \sin \omega t$ , а напряжение колеблется по закону  $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ .

Поскольку значения силы тока и напряжения меняются с каждым моментом, мощность в цепи переменного тока также постоянно меняется. Поэтому нас интересует не мгновенная мощность в цепи переменного тока, а среднее значение мощности за период. Выведем формулу для расчета среднего значения мощности в цепи переменного тока за период.

Определим мгновенную мощность  $P$ , а среднее значение мощности за период —  $\bar{P}$ . Мгновенная мощность находится путем умножения мгновенных значений силы тока и напряжения.

$$P = iu = I_m \sin \omega t \cdot U_m \sin(\omega t + \varphi) = I_m U_m \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + \varphi) - \cos(\omega t + \varphi + \omega t) = \frac{I_m U_m}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] = \frac{I_m U_m}{2} \cos \varphi - \frac{I_m U_m}{2} \cos(2\omega t + \varphi)$$

Отсюда и мгновенная мощность имеет вид:

$$P = \frac{I_m U_m}{2} \cos \varphi - \frac{I_m U_m}{2} \cos(2\omega t + \varphi)$$

Здесь 2-член

$$\frac{IU_m \cos(2\omega t + \varphi)}{2}$$

среднее значение за период будет равно нулю. Следовательно, средняя мощность за один период равна:

$$\bar{P} = \frac{IU_m \cos \varphi}{2}$$

Следовательно, выражение средней мощности для цепи произвольного переменного тока через максимальные и действующие значения силы тока и напряжения будет следующим:

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \frac{I_m U_m \cos \varphi}{2} = \frac{I_m^2 R \cos \varphi}{2} = \frac{U_m^2 \cos \varphi}{2R} \\ \bar{P} &= IU \cos \varphi = I^2 R \cos \varphi = \frac{U^2 \cos \varphi}{R} \end{aligned} \quad (45.18)$$

Здесь:  $\cos \varphi$  - называется коэффициентом мощности. Чтобы увеличить значение средней мощности, цепь должна быть собрана таким образом, чтобы коэффициент мощности был максимально приближен к единице. Независимо от того, насколько велики действующие значения силы тока и напряжения, если  $\varphi=90^\circ$  то, энергия источника переменного тока не может быть использована. Если в течение первого полупериода потребитель получает энергию от источника тока, то в течение следующего полупериода эта энергия полностью возвращается к самому источнику тока. Потребители ничего не получают самостоятельно от источника переменного тока в течение периода. Примером может служить конденсатор или катушка, подключенная к источнику переменного тока. Поскольку  $\varphi=\pm 90^\circ$ , средняя емкость катушки или конденсатора за период будет равна нулю.

#### Резонанс в цепи переменного тока:

Из раздела механики известно, что резонансное явление возникает тогда, когда частота внешней вынуждающей силы равна к частоте частых колебаний. Когда силы трения и сопротивления слишком малы, амплитуда колебаний резко возрастает. В начале главы мы ознакомились с ходом механических и электрических величин. В связи с этим возникает вопрос о том, не происходит ли резонансное событие, когда сопротивление R слишком мало даже в электрических цепях.

Оказывается, это явление действительно может происходить в электрических цепях, называемых колебательными контурами. Оказывается явление резонанса резко проявляется в тех случаях, когда активное

сопротивление  $R \rightarrow 0$ . Собственная частота колебательного контура при малом активном сопротивлении определяется по формуле:  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

При вынужденных колебаниях сила тока достигает своего максимального значения, когда частота переменного напряжения, подаваемого на контур, равна частоте колебательного контура:

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Как и в случае механического резонанса, в резонансе колебательного контура возникают благоприятные условия для поступления энергии из внешнего источника. Мощность в контуре наибольшая, если сила тока такая же, как напряжение по фазе.

Как только подключается к внешнему переменному напряжению, сила тока в цепи не достигает своего резонансного значения сразу. Колебания постепенно улаживаются. Амплитуда колебаний силы тока увеличивается с каждым периодом до тех пор, пока энергия, выделяемая в резисторе, не станет равной энергии, поступающей в контур за это время.

$$\frac{I_m^2 R}{2} = \frac{I_m U_m}{2}$$

Отсюда для амплитуды силы тока, определяемой при резонансе равно:

$$I_m = \frac{U_m}{R}$$

Когда  $R \rightarrow 0$ , значение резонансного тока увеличивается бесконечно. А когда R слишком большой, говорить о резонансе не имеет смысла.

Вместе с увеличением силы тока при резонансе резко возрастают напряжения на конденсаторе и катушках.

#### Вопросы по теме:

1. Запишите выражение закона Ома для случая, когда активное сопротивление, конденсатор и катушка соединены последовательно.
2. Чему равно общее напряжение и сопротивление при последовательном соединении активного сопротивления, конденсатора и катушки. Каков сдвиг фаз в этом?
3. Когда активное сопротивление, конденсатор и катушка соединены последовательно, когда сила тока опережает, а напряжение опережает?
4. Каково общее сопротивление и сдвиг фаз при последовательном соединении конденсатора и катушки?
5. Запишите выражение закона Ома для случая, когда активное сопротивление, конденсатор и катушка соединены параллельно.
6. Чему равно общее напряжение и сопротивление при параллельном соединении активного сопротивления, конденсатора и катушки. Каков

- сдвиг фаз в ток?
7. Когда активное сопротивление, конденсатор и катушка подключены параллельно, когда сила тока опережает, а напряжение опережает?
  8. Каково общее сопротивление и сдвиг фаз при параллельном соединении конденсатора и катушки?
  9. Запишите выражения средней мощности для цепи переменного тока.
  10. Что такое резонанс? Когда происходит резонансное явление?

**Решение задач:**

1. Как изменится сопротивление индуктивной катушки в цепи, если частота переменного тока увеличится в 2 раза?

- А) увеличивается в 2 раза  
Б) уменьшается в 2 раза  
В) не изменяется  
Г) уменьшается в 4 раза

**Дано:**

$v_2 = 2v_1$   
 $R_{L2}/R_{L1} = ?$   
Записав формулу расчета индуктивного сопротивления для двух случаев, когда в цепи переменного тока подключена только индуктивная катушка, получим соотношение:

$$\begin{cases} R_{L1} = \omega_1 L = 2\pi v_1 L \\ R_{L2} = \omega_2 L = 2\pi v_2 L \end{cases} \Rightarrow \frac{R_{L2}}{R_{L1}} = \frac{2\pi v_2 L}{2\pi v_1 L} = \frac{v_2}{v_1} = 2$$

$R_{L2} = 2R_{L1}$  следовательно, он увеличивается в два раза.

Ответ: А) увеличивается в 2 раза

2. Конденсатор емкостью 40 мкФ заряжается до напряжения 200 В и подключается к катушке индуктивности 0,1 Гн. Какое максимальное значение силы тока на катушке (А)?

- А) 0,2 В) 0,4 С) 2 Д) 4

**Дано:**

$C = 40 \text{ мкФ}$   
 $U_0 = 200 \text{ В}$   
 $L = 0,1 \text{ Гн}$

**Решение:**

Максимальное значение энергии электрического поля равно максимальной энергии магнитного поля.

$$W_M = W_E, \quad \frac{CU_0^2}{2} = \frac{Li_0^2}{2}$$

$I_0 = ?$

$$I_0 = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} = 200 \sqrt{\frac{40 \cdot 10^{-6}}{0,1}} = 200 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 4 \text{ А}$$

Ответ Д)

3. Цепь построена из последовательно соединенных активного сопротивления 9 Ом и индуктивного сопротивления 12 Ом. Найдите косинус сдвига фаз между колебаниями тока и напряжения.

**Дано:**  $R = 9 \text{ Ом}$   
 $R_L = 12 \text{ Ом}$   
 $\cos \varphi = ?$

**Решение** Катушка активного сопротивления и индуктивность подключены к цепи переменного тока. Полное сопротивление цепи находится следующим образом

$$Z = \sqrt{R^2 + R_L^2}$$

Полное сопротивление,  $R$  – активное сопротивление,  $R_L$  – индуктивное сопротивление.

$$Z = \sqrt{9^2 + 12^2} = \sqrt{225} = 15 \text{ Ом}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{9}{15} = 0,6$$

Ответ:  $\cos \varphi = 0,6$

**§ 46. ТРАНСФОРМАТОР И ПЕРЕДАЧА В НЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА БОЛЬШИЕ РАСТОЯНИЯ.**

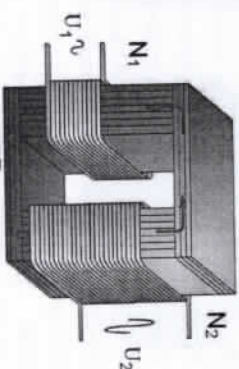
Не все электроприборы, которые мы используем в жизни, рассчитаны на 220 В. Это означает, что нужно будет изменить напряжение, чтобы использовать электроинструмент. С такой задачей обычно справляются трансформаторы.

**Трансформатор:**

Устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения, называется трансформатором.

Трансформатор состоит из двух изолированных проволочных обмоток катушек, надетых на общий стальной сердечник (рис. 46.1). Одна из катушек называется первичной катушкой, а другая – вторичной. Для того чтобы магнитный поток, возникающий на поверхности первичной обмотки, мог возникнуть и во вторичной обмотке, сердечники обычно изготавливают из ферромагнитных материалов с высокой магнитной проницаемостью. Это связано с тем, что в ферромагнитных элементах образуются вихревые токи – токи Фуко, выполняемые в виде пластин, разделенных между собой, чтобы они не нагревались.

Если число обмоток в первичной обмотке равно  $N_1$ , напряжение  $U_1$ , сила тока  $I_1$ , то во вторичной обмотке число обмоток равно  $N_2$ , напряжение  $U_2$ , сила тока  $I_2$ .





Напряжение, подаваемое на первичную обмотку, создает  $U_1$  напряжение, напряжение в каждой обертке равно  $e = \frac{U_1}{N_1}$ . Почти весь магнитный поток,

исходящий из первичной обмотки, направляется вдоль ферромагнитного поля, а также пересекает вторичную обмотку. При изменении тока в катушке изменяется и магнитный поток, пересекающий поверхность катушки. Он также пересекает поверхность вторичной обмотки рядом с переменным магнитным потоком. В результате в каждой обмотке вторичной обмотки образуется индукционный ток ЭДС, равный  $e$ . Напряжение на выходе вторичной обмотки будет равно  $U_2 = eN_2 = \frac{N_2}{N_1}U_1$ . Отсюда следует величина,  $k$  — называемая коэффициентом трансформации  $\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = k$ .

*Отношение напряжений в обмотках соответственно равно отношению количества обмоток, это отношение называется коэффициентом трансформации.*

$$k = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (46.1)$$

Для трансформаторов важен коэффициент  $k$ . В зависимости от того, насколько нужно изменить напряжение, выбирается значение  $k$ . В частности, значение коэффициента трансформации может быть как повышающим, так и понижающим, в зависимости от того, больше или меньше единицы.

Если  $k > 1$ , то  $U_2 < U_1$ , тогда трансформатор является понижающим.

Если  $k = 1$ , то  $U_2 = U_1$ , тогда трансформаторе изменений не будет.

Если  $k < 1$ , то  $U_2 > U_1$ , тогда трансформатор является повышающим.

*Коэффициент полезного действия трансформатора:*

Мощность, выделяемая в этой цепи при подключении вторичной обмотки трансформатора к потребителю, называется мощностью трансформатора в рабочем режиме. Отношение мощности во вторичной обмотке трансформатора к мощности в первичной обмотке называется КПД в режиме работы трансформатора.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1} \quad (46.2)$$

Обычно коэффициент полезного действия трансформаторов очень близок к 100%, который находится в диапазоне  $\eta = 98-99,5\%$ . Когда задачи решаются, берут  $\eta = 100\%$ .

Во сколько раз трансформатор увеличивает напряжение, во столько раз уменьшает силу тока. Следовательно, мощность никогда не может быть передана без превышения. Это можно сравнить с золотым правилом

механики. Потому что, согласно правилу сохранения энергии, невозможно сделать устройство, которое выигрывает от работы или энергии. Мощность в обеих камерах будет практически одинаковой, за исключением нагрева катушек.

$$P_2 \approx P_1, \quad I_1 U_1 \approx I_2 U_2, \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (46.3)$$

*Трансформатор в режиме холостого хода:*

Работа трансформатора без подключения вторичной обмотки к потребителю-нагрузке называется работой холостого хода трансформатора.

При работе трансформатора в режиме холостого хода выходное напряжение во вторичной обмотке равно  $U_2$ , а поскольку вторичная обмотка является несвязанный, то сила тока в ней равна  $I_2 = 0$ . Поэтому во вторичной обмотке также не будет потерь мощности, то есть будет  $P_2 = 0$ . Но в первичной обмотке трансформатора сила тока будет равна  $I_1 \neq 0$ , а мощность  $P_1 \neq 0$ . Потому что первичная обмотка подключена, и это также происходит из-за наличия электрического сопротивления первичной обмотки. Таким образом, в режиме работы трансформатора холостого хода потеря энергии происходит только в первичной цепи, то есть в этом режиме происходит только перегрев в первичной цепи.

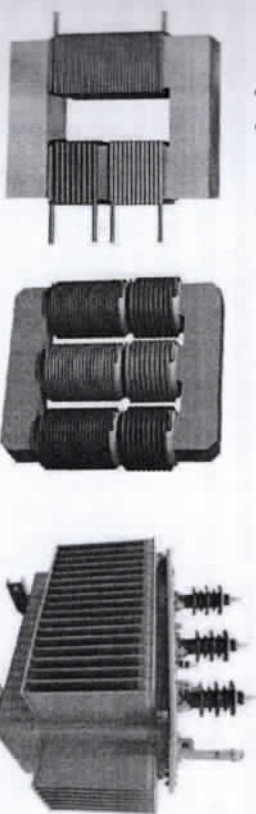


Рисунок 46.2

Рисунок 46.3

Без трансформеров невозможно представить нашу сегодняшнюю жизнь. Поскольку каждый электроприбор в нашем доме подключен к переменному напряжению 220 В, в каждом из них будет установлен понижающий трансформатор. Трансформатор, который мы рассмотрели выше, был принципом работы простейшего трансформатора. Кроме того, в настоящее время существует множество типов трансформаторов в зависимости от цели их использования. На один сердечник надевают несколько обмоток, из которых можно получить несколько выходных напряжений (рис.46.2). На рисунке 46.3 изображен понижающий трансформатор, используемый в населенных пунктах.

**Передача электроэнергии на большие расстояния с помощью трансформаторов:**

В дополнение к использованию трансформаторов для преобразования переменного тока, они также используются и для передачи и передачи переменного тока на большие расстояния. Большое значение имеет безотходная подача электроэнергии от ГЭС, ТЭС и АЭС, где они разрабатываются, на большие расстояния — в населенные пункты, расположенные за сотни, тысячи километров, к заводам, заводам и другим потребителям. Вопрос электрификации населения является одним из приоритетных в каждой государственной политике. Почти на 90% потребности населения в электроэнергии покрываются за счет источников переменного тока, то есть гидроэлектростанций (ГЭС), тепловых электростанций (ТЭС). Остальное приходится на ветряные электростанции, солнечные электростанции. На рисунке 46.4 изображена схема подачи переменного тока в населенные пункты по линиям постоянного напряжения и усиленным и понижающим трансформаторам, разработанным на ГЭС, АЭС или ТЭС. Сначала на электростанциях индуцированный ток преобразуется в сотни киловольт усиленным трансформатором, который передает высокое напряжение на сотни, а то и тысячи километров по высоковольтным линиям, затем через понижающий трансформатор (малую станцию), пониженный до напряжения 10–15 кВ, подается в ближайшие населенные пункты, наконец, в этих населенных пунктах ток понижается до 220 В и распределяется по жилым домам и предприятиям.

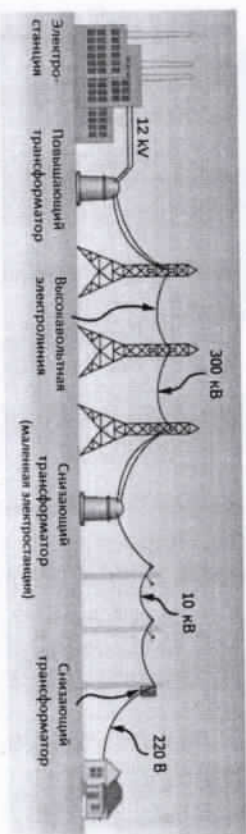


Рисунок 46.4

Одна из основных проблем при передаче электроэнергии на большие расстояния заключается в том, что необходимо доставлять электроэнергию до пункта назначения без возможных потерь, т. е. необходимо, чтобы потери электроэнергии в проводах линии электропередачи были максимально минимизированы. Для этого по закону Джоуля-Ленца сила тока в линии максимально уменьшается  $Q = I^2 R \Delta l$ . Поскольку сила тока в линии является

выходной силой тока во вторичной обмотке трансформатора, необходимо максимально увеличить выходное напряжение во вторичной обмотке.

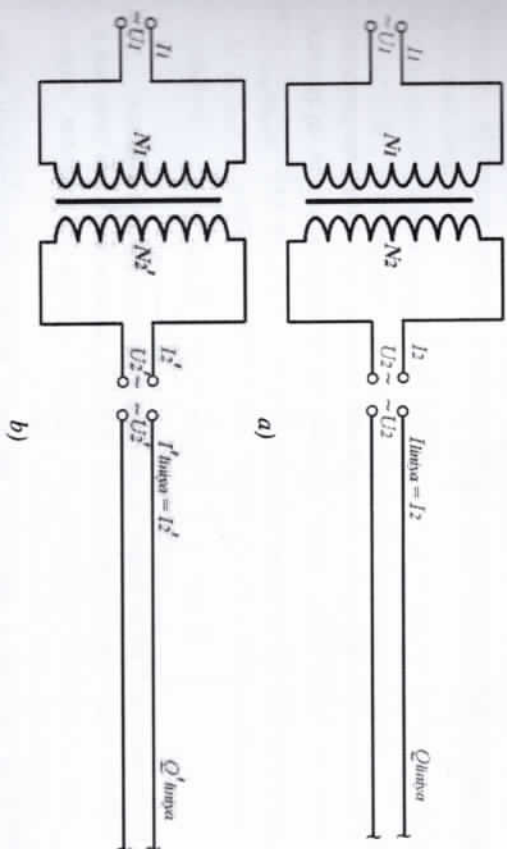


Рисунок 46.5

В нашем распоряжении два трансформатора, пусть в первичных обмотках этих трансформаторов будет одинаковое количество обмоток  $N_1$ , а во вторичных обмотках разное количество обмоток  $N_2$  и  $N_2'$ . В трансформаторах входное напряжение  $U_1$ , входной ток равен  $I_1$ , а выходные напряжения и силы тока различны. Значения выходного напряжения и силы тока будут соответственно  $U_2$  и  $I_2$  на первом трансформаторе, а на втором трансформаторе  $U_2'$  и  $I_2'$  (рис.46.5). При передаче электрической энергии на большие расстояния с помощью трансформатора 1 происходит потеря энергии в проводах линии  $Q_{линия}$ , а при передаче с помощью трансформатора 2 потеря энергии в проводах линии  $Q'_{линия}$  (рис.46.5). Количество теплоты, выделяющиеся в проводах линии в обоих случаях равно:

$$\begin{cases} Q_{линия} = I_2^2 R \Delta l \\ Q'_{линия} = I_2'^2 R \Delta l \end{cases}$$

Это соотношение двух неравенств

$$\frac{Q_{линия}}{Q'_{линия}} = \frac{I_2^2 R \Delta l}{I_2'^2 R \Delta l} = \left( \frac{I_2}{I_2'} \right)^2$$

в этом

$$\frac{Q_{\text{мин}}}{Q_{\text{линии}}} = \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2 = \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2$$

Находим от этого некоему величину:

$$Q_{\text{мин}} = \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2 Q_{\text{линии}} = \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 Q_{\text{линии}}$$

Следовательно, если сила тока в линии равна  $I_2$ , то энергия, потраченная впустую на линиях  $Q_{\text{мин}}$ , равна энергии, потраченной впустую на линиях

$Q_{\text{мин}}$ , когда сила тока в линии равна  $I_1$ :

$$Q_{\text{линии}} = \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2 Q_{\text{линии}} = \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2 Q_{\text{линии}} \quad (46.4)$$

Из приведенной выше формулы можно сделать следующие выводы:

1) Если напряжение во вторичной обмотке увеличить в  $n$  раз (или ток в ней уменьшить в  $n$  раз), то потери энергии в проводах линии электропередачи уменьшатся в  $n^2$  раз.

2) Если бы потери энергии в проводах линии электропередачи были уменьшены в  $n$  раз, напряжение во вторичной цепи было бы увеличено в  $\sqrt{n}$  раз (или сила тока в ней была бы уменьшена в  $\sqrt{n}$  раз).

Благодаря стремительному росту населения, стремлению людей к улучшению условий жизни, потребность в электроэнергии с каждым годом возрастает, при этом постепенно набирает популярность использование и альтернативных источников энергии. В качестве примера можно привести растущее число солнечных электростанций (СЭС), ветряных электростанций (ВЭС) и мини-электростанций.

Вопросы по теме:

1. Что такое трансформатор? Что такое первичная и вторичная обмотка?
2. Что такое коэффициент трансформации? Запишите его формулу.
3. Объясните работу трансформатора на холостом ходу и при нагрузке.
4. Когда трансформаторы считаются повышающими, а когда понижающими?
5. Что такое КПД трансформатора? Почему КПД должен быть как можно ближе к 100%?
6. Почему электричество передается на большие расстояния с более высокими напряжениями?

**Решение задачи:**

1. Ток течет в трубу водородного разряда напряжением 5 кВ, подключенную к напряжению 110 В. Эта труба распределяет мощность

75 Вт вокруг. Определить ток: а) отношение числа витков во второй контуре к числу витков в первом контуре; б) силу тока в каждом контуре; в) эквивалентное сопротивление первого контура активному сопротивлению.

Дано:

$$U_1 = 110 \text{ В} \\ U_2 = 5 \text{ кВ} \\ P_2 = 75 \text{ В}$$

Решение:

а) воспользуемся формулой передаточного числа.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}, \rightarrow \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{5000 \text{ В}}{110 \text{ В}} \approx 45,45$$

а)  $N_2/N_1 = ?$

б) по закону сохранения энергии мощности в обмотках равны. Используя это, определим силы тока в обмотках.

б)  $I_1, I_2 = ?$

$$P_1 = P_2 = P, \begin{cases} P = I_1 U_1 \\ P = I_2 U_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_1 = \frac{P}{U_1} = \frac{75 \text{ Вт}}{110 \text{ В}} = 0,68 \text{ А} \\ I_2 = \frac{P}{U_2} = \frac{75 \text{ Вт}}{5000 \text{ В}} = 0,015 \text{ А} \end{cases}$$

в) определим эквивалентное сопротивление в первой обмотке, используя закон Ома.

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}, \rightarrow R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{110 \text{ В}}{0,68 \text{ А}} = 161,3 \text{ Ом}$$

$$\text{Ответ: а) } \frac{N_2}{N_1} = 45,45; \text{ б) } \begin{cases} I_1 = 0,68 \text{ А} \\ I_2 = 0,015 \text{ А} \end{cases}; \text{ в) } R_1 = 161,3 \text{ Ом}$$

2. На ГЭС наведено напряжение 5 кВ. Это напряжение должно передаваться по высоковольтным линиям (два ряда натянутых алюминиевых проводов) на расстояние до 500 км в другую область путем усиления трансформатором с коэффициентом переноса  $k = 0,025$ . Каждая обмотка имеет 7 проводов с поперечной поверхностью  $1 \text{ мм}^2$ . Сколько падений напряжения произошло на линии, если сила тока во вторичной обмотке равна 200 мА?

Дано:

$$U_1 = 110 \text{ В}, U_2 = 5 \text{ кВ} \\ k = 0,025, I_2 = 0,2 \text{ А} \\ l = 1000 \text{ км}$$

Решение:

Сначала определим электрическое сопротивление проводов линии.

$$R_{\text{линии}} = R \frac{l}{S} = 2,8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{м} \cdot \frac{10^6 \text{ м}}{7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} = 4000 \text{ Ом}$$

Определим падение напряжения на линии с помощью закона Ома.

$$I_{\text{линия}} = I_2 = \frac{\Delta U_{\text{линия}}}{R_{\text{линия}}}, \rightarrow \Delta U_{\text{линия}} = I_{\text{линия}} R_{\text{линия}} = 0,2 \text{ A} \cdot 4000 \text{ Ом} = 800 \text{ В}$$

Ответ:  $\Delta U_{\text{линия}} = 800 \text{ В}$

§ 47. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ГЕРЦА. СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Теория электромагнитного поля:

До этого времени было подчеркнуто, что электрическое и магнитное поле существуют отдельно. Электромагнитная теория Максвелла основана на том факте, что электрические и магнитные поля являются двумя компонентами единого электромагнитного поля. В основе электромагнитной теории лежат две идеи, подтверждающие, что электрическое и магнитное поля находятся в неразрывной связи:

В 60-х годах XIX века английский ученый Джеймс Клерк Максвелл создал единую электромагнитную теорию электрических и магнитных полей.

При создании этой теории Максвелл опирался на фундаментальные эксперименты, проведенные к тому времени. До этого времени было подчеркнуто, что электрическое и магнитное поле существуют отдельно. Электромагнитная теория Максвелла основана на том факте, что электрическое и магнитные поля являются двумя компонентами единого электромагнитного поля. В основе электромагнитной теории лежат две идеи, подтверждающие, что электрическое и магнитные поля находятся в неразрывной связи:

1) Изменяющееся во времени электрическое поле порождает изменяющееся магнитное поле;

2) Изменяющееся во времени магнитное поле порождает изменяющееся электрическое поле;



Рисунок 47.1

Когда электрическое поле смещается или изменяется, возникает магнитное поле, которое создает правый винт с этим электрическим полем. Отсюда следует, что возникающее магнитное поле лежит в плоскости, перпендикулярной возникшему электрическому полю (рис.47.1-а).

Магнитное поле вокруг прямого тока также возникает именно из-за смещения свободных электронов внутри проводника постоянного тока.

При перемещении или изменении магнитного поля возникает электрическое поле, которое создает левый винт с этим электрическим полем. Отсюда следует, что возникающее электрическое поле лежит в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, вызвавшему его (рис.46.1-б). Электрическое поле, создаваемое переменным магнитным полем, также называется вихревым электрическим полем. Вихревое электрическое поле принципиально отличается от электростатического поля. Электростатическое поле имеет характер потенциала, который начинается с заряда и заканчивается зарядом, то есть электростатическое поле имеет начало и конец. В то время как вихревое электрическое поле не начинается с заряда и не заканчивается зарядом, оно не имеет начала и конца. Он такой же вихревым, как и магнитное поле. Вихревое электрическое поле создает разность потенциалов на концах проводника при воздействии на открытый проводник, а при воздействии на закрытой проводник индуцирует электрический ток, перемещая его свободные электроны. В явлении электромагнитной индукции именно это вихревое электрическое поле индуцирует индуцированный ток в контуре.

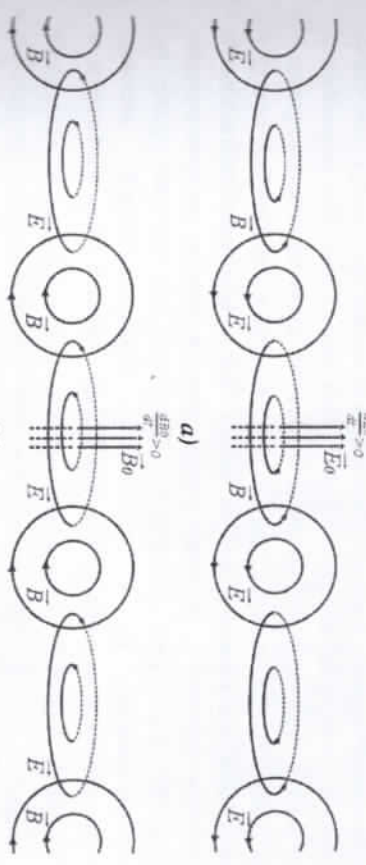


Рисунок 47.2

Таким образом, оказывается, что электрическое и магнитные поля не могут быть отделены друг от друга. Там, где изменяется электрическое поле, возникает магнитное поле и наоборот, а там, где изменяется магнитное поле, возникает электрическое поле. Когда магнитное поле изменяется или смещается в какой-либо области пространства, в этой области обязательно возникает электрическое поле. Иными словами, переменные электрические и

магнитные поля "рождают" друг друга, то есть являются создателями друг друга тороидными друг друга (рис.47.2).

*Эксперименты Герца:*

Процесс распространения в пространстве периодически изменяющегося электромагнитного поля называется электромагнитной волной.

Ученые предположили, что с помощью колебательного контура можно создать электромагнитную волну. Можно также создать электромагнитную волну, используя колебательный контур, но при этом энергия электромагнитной волны, распространяющейся вокруг, будет намного меньше. Потому что, поскольку энергия электрического поля сосредоточена между обложками конденсатора, а энергия магнитного поля сосредоточена в катушке, очень мало волн распространяется вокруг. Такой контур называют закрытым колебательным контуром (рис. 46.3-а). Частота должна быть увеличена, чтобы распространение волн вокруг было значительным. Для увеличения частоты необходимо будет уменьшить индуктивность и емкость по формуле  $\nu = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}}$ . Это достигается за счет увеличения расстояния

между обложками конденсатора и катушечными катушками (рис.47.3-б). Для дальнейшего увеличения частоты необходимо вместо катушек катушек взять прямой провод, а между обложками конденсатора сделать еще более длинный и открытый колебательный контур (рис.47.3-в). Для дальнейшего увеличения частоты необходимо вместо катушек взять правильный провод, а между обложками конденсатора сделать открытой колебательный контур с дальнейшим его удлинением. (рис.47.3-с) При подключении вертикальной проволоки антенны к обложке конденсатора в контуре распространение волны по периферии улучшается. При этом по антенне волна не распространяется, а в плоскости, перпендикулярной антенне, распространяется сильнее всего. (рис.47.3-д). Антенна была изобретена в 1895 году АС Поповым.

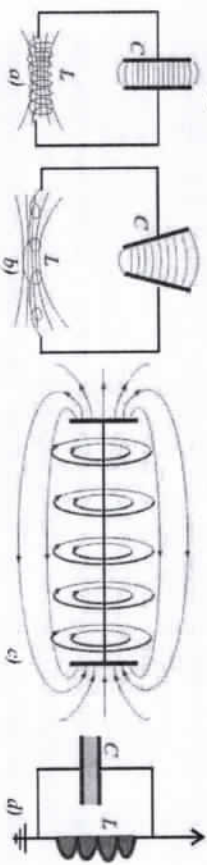


Рисунок 47.3

Открытый колебательный контур также можно формировать, взяв правильную проволоку — стержень и разделив ее пополам посередине. Емкость увеличивается, если сделать разрез в форме шара путем его утолщения. Это место среза называется искровым промежутком. Используя такое устройство, в 1888 году 1-й раз в мире немецкий физик Герц искусственно генерировал электромагнитные волны. Это устройство в его честь назвали вибратором Герца (рис.46.4).

Герцу в своих экспериментах удалось генерировать электромагнитные волны по порядку  $10^8$  Гц, то есть в интервале с длиной волны 0,6—10 м. Позже, в 1895 году, П.Н.Лебедев с помощью очень маленького вибратора генерировал электромагнитные волны длиной 0,6 мм. Еще более короткие, порядка 0,1 мм в длину электромагнитные волны были позже сформированы Главогевой и Аркальевой в 1923 году.

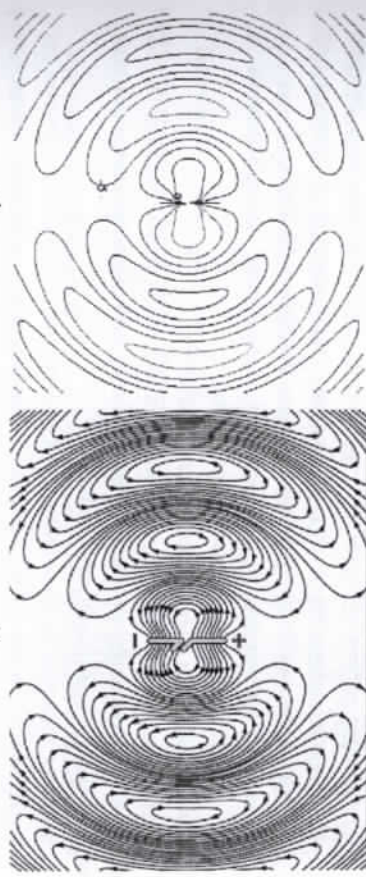


Рисунок 47.5

Поскольку в колебательном контуре заряженные частицы движутся колебательно, можно сказать, что электромагнитная волна создается заряженными частицами, движущимися колебательно. Самый простой способ генерировать электромагнитные волны—это заставить электрический диполь вибрировать. Другими словами, если электрический диполь, плечо которого равно  $l$ , совершает колебательное движение, изменяя расстояние между зарядами  $-l < r < l$ , электромагнитная волна распространяется от этого электрического диполя к окружающей среде. На рисунке 47.5 приведено мгновенное изображение электромагнитной волны, образующейся при колебаниях электрического диполя. На очень больших расстояниях от

дипольного плеча электромагнитная волна принимает почти сферическую форму.

*Свойства электромагнитных волн:*

Электромагнитные волны обладают рядом свойств, среди которых можно перечислить некоторые:

- 1) скорость электромагнитных волн равна скорости света в вакууме  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с;
- 2) электромагнитные волны относятся к числу поперечных волн, в которых векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  колеблются во взаимно перпендикулярной плоскости;
- 3) скорость электромагнитных волн в среде меньше, чем в вакууме ( $\beta < c$ ). Кроме того, при переходе из вакуума в среду длина волны электромагнитной волны также уменьшается, а частота остается неизменной;
- 4) электромагнитная волна распространяется по прямой. Кроме того, экспериментально доказано, что металл может отскакивать от него при столкновении с препятствиями, преломляться в треугольной призме из парафина, фокусироваться в парафиновой линзе;
- 5) электромагнитная волна обладает свойствами интерференции и дифракции, как и механические волны.

**Интенсивность электромагнитной волны:**

Важно не просто распространение электромагнитной волны, а то, насколько интенсивно, она распространяется. С этой целью вводится понятие интенсивности электромагнитной волны.

*Энергия электромагнитной волны, движущаяся в единицу времени от поверхности, перпендикулярной направлению распространения электромагнитной волны, называется интенсивностью электромагнитной волны. Другими словами, интенсивность — это мощность электромагнитной волны, проходящей через единицу поверхности.*

Интенсивность электромагнитной волны будет:

$$I = \frac{W}{St} = \frac{P}{t} \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

или

$$I = \omega \cdot c \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

Здесь:  $S$  — контурная поверхность произвольной формы, расположенная перпендикулярно направлению распространения электромагнитной волны,  $W$  — энергия волны, проходящей через поверхность, время прохождения энергии, плотность потока энергии, единица измерения  $[\omega] = [\text{Дж} / \text{м}^2 \cdot \text{с}]$ .

**Вектор Умова-Пойнтинга:**

Электромагнитное поле также будет существовать без электрических зарядов или токоведущих проводников. Только при этом электромагнитное поле, проявляясь в виде волны, распространяется по окружности со скоростью, равной  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Поскольку электромагнитное поле обладает энергией, электромагнитная волна также несет с собой энергию электрического и магнитного полей при распространении. Плотности энергий электрического и магнитного полей мы познакомились в предыдущих главах.

$$\omega_e = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2}, \quad \omega_m = \frac{\mu \mu_0 H^2}{2}$$

При распространении электромагнитной волны эти энергии распространяются вместе, то есть энергия электромагнитного поля равна сумме энергий электрического и магнитного полей.

$$\omega = \omega_e + \omega_m = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu \mu_0 H^2}{2}$$

Если вспомнить, что в колебательном контуре энергии электрического и магнитного полей циклически вращаются друг вокруг друга, то получится равенство энергий электрического и магнитного полей.

$$\omega = \omega_e + \omega_m = 2\omega_e = 2\omega_m \quad \text{или} \quad \omega = \epsilon \epsilon_0 E^2 = \mu \mu_0 H^2$$

Из этого,  $\sqrt{\omega} = \sqrt{\epsilon \epsilon_0} E = \sqrt{\mu \mu_0} H$

выражение плотности энергии также имеет вид:

$$\omega = \sqrt{\omega} \cdot \sqrt{\omega} = \sqrt{\epsilon \epsilon_0} E \cdot \sqrt{\mu \mu_0} H = \sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0} E H$$

Мы знакомы с формулой  $\eta = \frac{c}{n} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ . Поэтому приведенная выше формула принимает следующий вид:

$$\omega = \frac{E H}{\eta}$$

В результате получаем эту формулу, которая называется плотностью потока энергии:

$$S = \omega \eta = E H \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

*Энергия, приходящаяся на единицу электромагнитной волны, движущаяся в единицу времени от поверхности, перпендикулярной направлению распространения электромагнитной волны, называется плотностью потока.*

Учитывая интенсивность  $I = \frac{W}{S_1}$  электромагнитной волны, интенсивность

и плотность потока энергии-это одно и то же.

Векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  взаимны и перпендикулярны направлению распространения волны. Другими словами, векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  образуют правильный винт с направлением распространения волны (рис.47.6). Используя это, плотность потока энергии также можно записать в векторном виде.

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

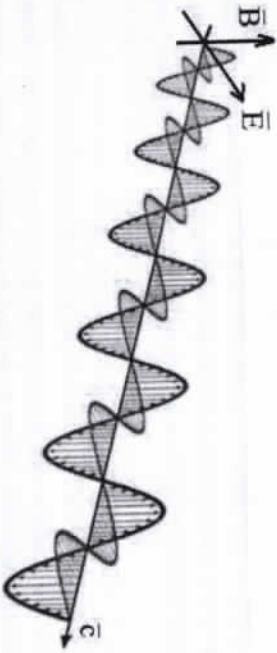


Рисунок 47.6

Впервые понятие вектора плотности потока энергии было введено русским ученым Н.А.Умовым в 1874 г. в общем случае для волн. Это понятие было введено в 1884 году английским физиком Дж.Г.Пойнтингом в частном случае использовал именно к электромагнитным волнам. Поэтому вектор плотности потока энергии называют вектором Умова-Пойнтинга.

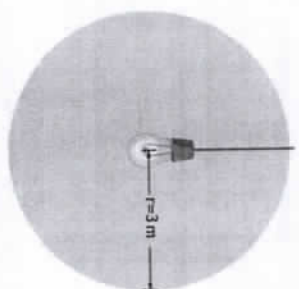
Вопросы по теме:

1. Что называют вектором электромагнитным полем?
2. Объясните, как электрические и магнитные поля образуют друг друга.
3. Опишите опыт Герца.
4. Как электромагнитная волна передается на большие расстояния?
5. Что такое вектор Умова-Пойнтинга? Скажите его количество и направление.
6. Напишите формулу плотности энергии электромагнитного поля.

Решение задач:

1. Лампа "Аква" мощностью 5 Вт излучает только видимые лучи. Чему равно напряженность электрического поля и вектор магнитного индукция поля в точке на расстоянии 3 м от этой лампы (см. рисунок)?

Дано:	Решение:
$P=5 \text{ Вт}$	Плотность
$r=3 \text{ м}$	электрического поля
$E=?$	$\omega = \frac{\epsilon_0 E^2}{2}$
$V=?$	и связь между интенсивностью
	$I = \frac{W}{St} = \frac{P}{4\pi r^2}$
	$I = \omega c$



определим напряженность электрического поля с помощью.

$$\frac{P}{4\pi r^2} = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} c, \rightarrow E_0 = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{P}{2\pi \epsilon_0 c}} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{5 \text{ Вт}}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кг}^2} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}} = 5,77 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

Теперь давайте определим индукцию магнитного поля, используя связь между электрическим и магнитным полем.

$$V_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{5,77 \text{ Вт/м}}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 1,92 \cdot 10^{-8} \text{ Тл}$$

Ответ:  $E_0 = 5,77 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$ ;  $V_0 = 1,92 \cdot 10^{-8} \text{ Тл}$

### § 48. ПОНЯТИЕ О РАДИОСВЯЗИ. ТЕЛЕВИДЕНИЕ И РАДИО-ЛОКАЦИИ. ШКАЛА РАДИОВОЛН.

Понятие о радиосвязи, телевидении и радиолокации:

Известно, что звуковые волны находятся в диапазоне своих колебаний 20–20000 Гс,  $10^3 - 10^7$  в разы меньше, чем частоты  $10^4 - 10^{11}$  Гс, используемые в радиосвязи. Энергия электромагнитной волны, излучаемой вибратором, пропорциональна 4-му степени частоты  $(\omega \sim \nu^4)$ . При преобразовании звуковой волны в электрические сигналы она практически не излучается, не рассеивается. А для электромагнитно-волнового излучения низкочастотные звуковые сигналы дополняются высокочастотными колебаниями, то есть модулируются. Возникающие при этом колебания называются модулированными колебаниями, колебания, модулирующие звуковые колебания, и колебания, передающие высокочастотные электрические колебания. Радиоволна, модулированная низкочастотными звуковыми колебаниями, называется радиосигналом. На рисунке 48.1 представлена схема этого процесса.

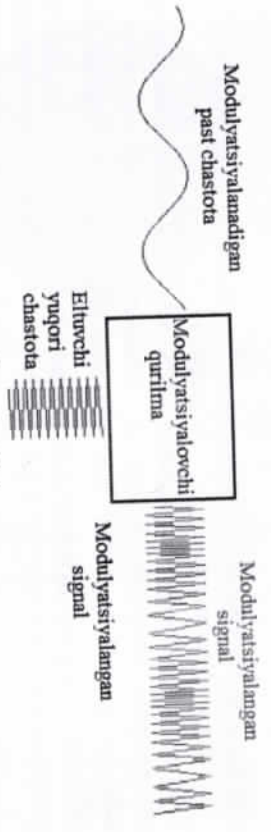


Рисунок 48.1

При изменении амплитуды колебаний в результате модуляции образуется амплитудная модуляция, при изменении частоты - частотная модуляция. На рисунке 48.2-а изображены низкочастотные звуковые колебания, на рисунке 48.2-б - высокочастотные электрические колебания и на рисунке 47.2-с, д - модулированные колебания амплитуды и частоты.

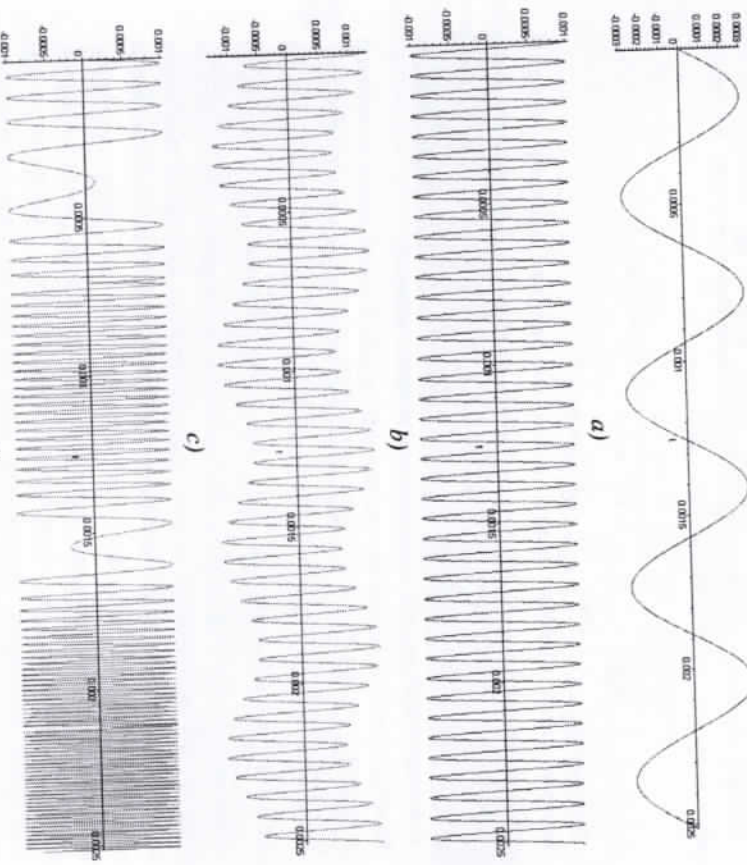


Рисунок 48.2

Радиоволны улавливаются и преобразуются в звуковые сигналы с помощью специальных устройств, называемых приемниками (приемниками). Но в этом случае высокочастотный звуковой сигнал не слышен человеческим ухом. Поэтому из этих сигналов выделяются низкочастотные звуковые сигналы, то есть выполняется работа, обратная модулированию.

Метод извлечения низкочастотных звуковых колебаний из модулированных колебаний с помощью приемников называется детектированием.

В то время как радиосвязь используется для передачи радиопередатч и различных голосовых сообщений, телевидение используется для передачи изображений. В телепередачах 25 кадров в секунду чередуются последовательно. Но мы этого не замечаем. Каждый кадр преобразуется в видеосигнал и дополнительно модулируется высокочастотным электрическим сигналом. Для реализации этой модуляции необходимо использовать электрические колебания сверхвысокой частоты. Другими словами, частота передающей колебаний должна будет принадлежать ультракороткому полю. Но видеосигналы, передаваемые ультракороткими волнами, будут иметь свойство поглощаться земной поверхностью и проходить сквозь слой ионосферы. В результате можно будет транслировать телепередачи в поле зрения. Для передачи телепередач на большие расстояния их транслируют с более высоких точек - телебашен. Высота Останкинской телебашни составляет 540 м, телепередачи можно передавать на 130 км, а высота Ташкентской телебашни - 375 м, телепередачи можно передавать на 100 км.

Принцип работы радиосвязи и телевидения основан на резонансном явлении, которое происходит в колебательном контуре. Явление резонанса возникает только тогда, когда колебательные контуры в колебательных контурах передатчика и приемника настроены на одну и ту же частоту.

Связь между активным сопротивлением, емкостью и максимальным значением силы тока для индуктивности, последовательно подключенной к цепи переменного тока, выглядит следующим образом, как мы говорили ранее:

$$I_M = \frac{U_M}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

С появлением мы познакомились в предыдущих выпусках. Если в этой цепи активное сопротивление равно  $R=0$ , а емкостное сопротивление равно индуктивному сопротивлению, сила тока в цепи будет бесконечно больше. В



этом же случае частота колебаний тока внешнего источника становится равной частоте колебаний контура.

$$X_C = X_L \rightarrow \omega L = \frac{1}{\omega C} \rightarrow \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \omega_0 \quad (48.1)$$

В колебательном контуре, активное сопротивление которого очень мало, амплитуда вынужденных колебаний тока резко возрастает, если его собственная частота становится равной частоте внешнего переменного напряжения. Именно из этого состоит резонанс в электрическом колебательном контуре. При резонансе сдвиг фазы между фазой внешнего напряжения и фазой силы тока в контуре равен нулю.

Частота и длина волны, которую колебательный контур может распространять или принимать, будут следующими:

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad \lambda = 2\pi c\sqrt{LC} \quad (48.2)$$

При увеличении силы тока в резонансе одновременно резко возрастают напряжения на конденсаторе и катушке индуктивности. Эти напряжения равны по величине и превышают внешнее напряжение в несколько раз.

$$\begin{cases} U_{L, \text{рез}} = I_{L, \text{рез}} \cdot \frac{1}{\omega C} = I_{L, \text{рез}} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \\ U_{C, \text{рез}} = I_{L, \text{рез}} \cdot \omega L = I_{L, \text{рез}} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \end{cases} \quad (48.3)$$

Радиолокация основана на отражении дециметровых радиоволн от поверхностей различных тел и предметов. При этом обнаруживаются крупные объекты, айсберги, корабли и самолеты, скрывающиеся за темным туманом на расстоянии 200-300 км или находящиеся в темноте. Устройство, используемое для этой цели, называется радиолокаторами.

Сигналы от радиолокатора отправляются в виде коротких импульсов. Длительность одного импульса имеет порядок  $\tau \sim 10^{-6}$  с, а время между импульсами несколько больше, то есть на порядок  $T \sim 10^{-3}$  с. Амплитуда импульсов, возвращающихся от препятствия, будет значительно меньше, чем у отправленного импульса. Поэтому что, пока волна не доберется до препятствия, интенсивность волны ослабнет. Импульсы, посылаемые и возвращаемые с экрана радара, можно будет узнать по разнице между амплитудами одним взглядом.

Расстояние от радиолокатора до препятствия называется глубиной наблюдения. Перед тем, как посланный импульс вернется через препятствие, он пройдет путь, в 2 раза превышающий глубину наблюдения. Зная время

отправления и прибытия импульса, можно будет определить глубину наблюдения.

Глубина наблюдения от радара (расстояние до объекта) будет составлять:

$$R = \frac{ct}{2} \quad (48.4)$$

Здесь:  $\tau$  — время прохождения импульса.

Если радар излучает  $N$  импульсов в течение некоторого времени  $t$ , время прибытия одного импульса  $\tau$  и глубина наблюдения  $R$  будут следующими:

$$\tau = \frac{t}{N}, \quad R = \frac{ct}{2} = \frac{ct}{2N} \quad (48.5)$$

В настоящее время широкое развитие получила радиолокация, которая применяется не только для определения положения неподвижных объектов. Она также используется для изучения природных явлений, образования облаков, прогнозирования и предупреждения людей о ураганах, штормах и различных осадках, а также для других целей.

#### Шкала радиоволн:

Радиоволны используются в очень широком диапазоне. В зависимости от области использования и того, как далеко они передаются, они делятся на сверхдлинные, длинные, средние, короткие и ультракороткие волны. Потому что свойства преломления, отражения и поглощения радиоволн изменяются в зависимости от длины волны. Например, если длинные и средние волны могут проходить через земную поверхность и слой ионосферы, вращаясь много раз, как если бы они вращались от зеркала, в невидимые области земной поверхности, тогда как ультракороткие волны поглощаются земной поверхностью и проходят через слой ионосферы. Поэтому ультракороткие волны можно будет использовать только в видимых областях. Диапазон радиоволн приведен в таблице ниже.

Таблица 48.1

Название волны	Диапазон волн, м	Диапазон частот, Гц
Сверхдлинные волны	Большее, чем 10 000 м.	Большее, чем $3 \cdot 10^4$
Длинные волны	10 000-1000	$3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$
Средние волны	1000-100	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$
Короткие волны	100-10	$3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$
Ультразвуковые волны:		
-метровые	10-1	$3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^8$
-дециметровые	1-0,1	$3 \cdot 10^8 - 3 \cdot 10^9$
-сантиметровые	0,1-0,01	$3 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{10}$
-/миллиметровые	0,01-0,001	$3 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{11}$

В поле после миллиметровых радиоволн, то есть в коротковолновом поле электромагнитных волн, лежат микрометровые, инфракрасные, белого света, ультрафиолетовые, рентгеновские и  $\gamma$ -лучи. Об этом будет рассказано в следующих главах.

Вопросы по теме:

1. Почему низкочастотные электрические колебания нельзя передавать на большие расстояния?
2. Как электромагнитная волна передается на большие расстояния?
3. Что такое модуляция? Какие имеет виды?
4. Что такое детектирование?
5. По какой формуле находят глубину наблюдения?
6. Охарактеризуйте различные диапазоны радиоволн.

**Решение задач:**

1. Антенна излучает электромагнитную волну с частотой 6 МГц. Сколько волн распространяется на расстоянии 100 км в направлении распространения волны?

- A) 1000 B) 1500 C) 1800 D) 2500 E) 2000

**Дано:**

$$\nu = 6 \cdot 10^6 \text{ Гц}$$

$$S = 10^5 \text{ м}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$n - ?$

**Решение:**

Чтобы найти количество волн, лежащих на расстоянии  $S$ . Мы должны разделить расстояние  $S$  на длину волны  $\lambda$

$$n = \frac{S}{\lambda}; \quad \lambda = \frac{c}{\nu}$$

$$n = \frac{S\nu}{c} = \frac{10^5 \cdot 6 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8} = 2 \cdot 10^3 = 2000$$

Ответ: E)

2. Какова длина электромагнитной волны (м), распространяющейся с космического корабля, с частотой 10 МГц.

**Дано:**

$$\nu = 10^7 \text{ Гц}$$

$\lambda - ?$

**Решение:**

$$\nu = \lambda\nu, \quad \lambda = \frac{c}{\nu}$$

$$\nu = c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{10^7} = 30 \text{ м}$$

Ответ: 30 м

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ГЛАВЕ VI**

Лабораторная работа: № 9.

Определение индуктивного сопротивления катушки с сердечником и без сердечника.

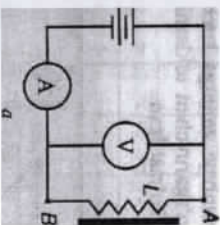
Цель работы: 1. Исследование отличия активных и реактивных сопротивлений. 2. Определение коэффициента самондукции катушки.

Необходимые инструменты и оборудование: Манометр переменного тока  $I_{pr} - 12 \text{ АУ}$ , амперметры для измерения постоянного и переменного тока, вольтметры для измерения постоянного и переменного тока, катушки для определения коэффициента самондукции, железный стержень, включатель и соединительные провода.

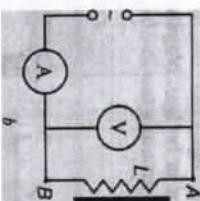
**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

Для этого из определенного участка замкнутой цепи поочередно пропускают постоянный, а затем переменный ток (рис.1-а,б). При подключении цепи к катушке постоянного тока, как показано на рисунке 1-а, через катушку АВ проходит постоянный ток. Тогда активное сопротивление участка АВ (катушки) в цепи, по показаниям амперметров и вольтметров, вычисляется с помощью следующего выражения:

$$R = U/I \quad (3)$$



а)



б)

Рисунок 1

Если эту же цепь (рис. 1 - б) подключить к источнику переменного тока, то полное сопротивление детали АВ (катушки) по закону Ома будет рассчитываться следующим образом:

$$Z = U/I \quad (4)$$

Поскольку цепь подключена к источнику переменного тока, полное сопротивление катушки определяется по ее активному и реактивному сопротивлением следующим образом:

$$Z^2 = R^2 + X_L^2 = R^2 + \omega^2 L^2 \quad (5)$$

Строение устройства

Электрическая схема устройства определения коэффициента индукции собрана по рис.1. В качестве источника тока в приборе применены источник тока  $I_{pr} - 12 \text{ АУ}$ , амперметры и вольтметры, измеряющие силу и напряжение постоянного и переменного тока, катушки, в которых определяется коэффициент самондукции, железный сердечник, включатель и

соединительный провод. Генератор переменного тока Jгр-12AV может подавать в цепь постоянный и переменный ток напряжением от 3 В до 12 В.

#### Порядок выполнения работ

1. Ознакомившись с инструкцией к лабораторной работе, соберите электрическую схему прибора и проверьте ее у преподавателя. Подучить разрешение учителя на запуск устройства.
2. Найти значение R, провода переменный ток через катушку постоянного тока, и значение Z, провода переменный ток
3. Вычислите средние значения активного и реактивного сопротивлений, повторив опыт для разных значений напряжения.
4. Определите коэффициент самондукции катушки по средним значениям результатов эксперимента.
5. Опустив на катушку железный стержень, повторите опыт, как описано выше.
6. Сравните коэффициенты уиндукции для состояний катушки без сердечника и с сердечником.
7. На основании результатов эксперимента заполните следующую таблицу.

Таблица 1

Определение индуктивного сопротивления катушки без сердечника.						
№	$R_d$ [Ом]	$U_l$ [В]	$I_l$ [А]	$Z_l$ [Ом]	$x_l$ [Ом]	$\delta$ $= \frac{\Delta x_l}{\bar{x}_l} \cdot 100\%$
1						
2						
3						




 $x_l = \bar{x}_l \pm \Delta x_l$

Таблица 2

Определение индуктивного сопротивления катушки с сердечником.						
№	$R_d$ [Ом]	$U_l$ [В]	$I_l$ [А]	$Z_l$ [Ом]	$x_l$ [Ом]	$\delta$ $= \frac{\Delta x_l}{\bar{x}_l} \cdot 100\%$
1						
2						
3						


 $x_l = \bar{x}_l \pm \Delta x_l$

#### Контрольные вопросы

1. Что называется индуктивностью?
2. Что называется самондукцией?
3. Какова формула для определения индуктивности для соленоида?
4. Что называется взаимной индукцией?

#### Лабораторная работа: № 10.

Определение емкостного сопротивления в цепи переменного тока.

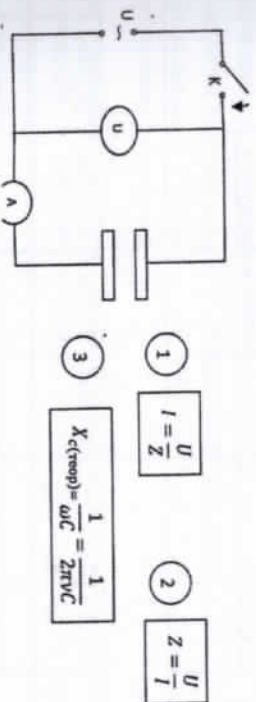
**Цель работы:** 1. Формирование общего понятия реактивного сопротивления. 2. Изучение измерять емкостное сопротивление конденсатора.

$$R_c = \frac{U_0}{I_0} \quad (1)$$

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi\nu C} \quad (2).$$

Необходимый инструмент и оборудование: Источник переменного тока напряжением 4-12В. 6мкФ бумажный конденсатор. Конденсатор неизвестной емкости. Миллиамперметр переменного тока. Соединительные провода. Одно- и двухполюсные электрические выключатели. Вольтметр переменного тока и другая вспомогательная приборы.

#### СТРОЕНИЕ И ПРИНЦИП РАБОТЫ УСТРОЙСТВА



Прибор состоит из амперметра и вольтметра переменного тока, конденсаторов известной и неизвестной емкости, источника переменного тока и электрических выключателей.

Для запуска устройства к основной сети переменного тока подключается прибор, подающий напряжение 24 В, затем добавляется выключатель К. Записывается показания вольтметра и амперметра, которые включаются в электрическую цепь.

Порядок выполнения работ

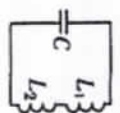
1. Получите разрешение на выполнение работы, ответив на вопросы преподавателя после прочтения и изучения инструкции к лабораторной работе и анализа схемы.
2. Изучите электрическую схему вашей лаборатории.
3. К обложкам конденсатора, емкость которого известна  $C$ , подключаем выключатель  $K$  для подачи переменного напряжения  $4-12 В$  с частотой  $50 Гц$ .
4. Вводим указатель приборов в таблицу.
5. Рассчитаем емкостное сопротивление по формуле (1).
6. Находим среднее значение емкостного сопротивления.
7. Рассчитаем относительную и абсолютную погрешности.
8. Вычислим теоретическое значение емкостного сопротивления с частотой  $50 Гц$  по формуле (2).
9. Экспериментально и теоретически полученные значения емкостного сопротивления введем в таблицу и сравним их.
10. Меняем емкость конденсатора в схеме.
11. Находим значение емкостного сопротивления, повторяя эксперимент
12. По результатам опыта делаем вывод.

Таблица 1

№	$C_1$ $\cdot 10^{-6} \Phi$	$U_1 (V)$	$I$ $\cdot 10^{-3} (A)$	$x_c (Om)$	$\bar{x}_c (Om)$	$\Delta x_c (Om)$	$\Delta \bar{x}_c (Om)$	$\epsilon \%$
$x_{c(экс)} = \bar{x}_c \pm \Delta x_c$								
№	$C_1$ $\cdot 10^{-6} \Phi$	$U_1 (V)$	$I$ $\cdot 10^{-3} (A)$	$x_c (Om)$	$\bar{x}_c (Om)$	$\Delta x_c (Om)$	$\Delta \bar{x}_c (Om)$	$\epsilon \%$
1								
2								
3								
4								
5								
				$x_{c(экс)} = \bar{x}_c \pm \Delta x_c$				
				$x_{c(теор)} = \frac{1}{2\pi\nu C}$				
				$x_{c(экс)} = \bar{x}_c \pm \Delta x_c$				
				$x_{c(теор)} = \frac{1}{2\pi\nu C}$				

ТЕСТЫ ПО ГЛАВЕ VI

1. Найти выражение периода колебаний в колебательном контуре.
  - A)  $T = 2\pi\sqrt{L/g}$
  - B)  $T = \sqrt{2\pi/\omega}$
  - C)  $T = 2\pi\sqrt{LC}$
  - D)  $T = 2\pi\sqrt{m/k}$
  - E)  $T = \sqrt{t/\pi}$
2. Укажите формулу циклической частоты колебаний, которые образуются в контуре идеальных колебаний.
  - A)  $\omega = \sqrt{L/C}$
  - B)  $\omega = \sqrt{L/C}$
  - C)  $\omega = \sqrt{C/L}$
  - D)  $\omega = LC$
  - E)  $\omega = 1/\sqrt{LC}$
3. В каких случаях период колебаний в колебательном контуре увеличивается?
  - 1) при увеличении электрической емкости; 2) при уменьшении электрической емкости; 3) при увеличении индуктивности; 4) при уменьшении индуктивности?
  - A) 2; 3
  - B) 2; 4
  - C) 1; 4
  - D) 1; 3
  - E) 4
4. Как изменяется частота колебаний в контуре, если индуктивность контура колебаний увеличивается в 4 раза?
  - A) не изменяется
  - B) уменьшается в 4 раза
  - C) увеличивается в 4 раза
  - D) уменьшается в 2 раза
  - E) увеличивается в 2 раза.
5. Как изменится период колебаний в контуре, если увеличить индуктивность и емкость контура колебаний в 4 раза?
  - A) остается неизменным.
  - B) уменьшается в 4 раза.
  - C) увеличивается в 16 раз
  - D) уменьшается в 16 раз.
  - E) увеличивается в 4 раза.
6. Как изменится частота свободных электромагнитных колебаний, если индуктивность в контуре колебаний уменьшить в 2 раза, а емкость конденсатора увеличить в 8 раз?
  - A) уменьшается в 2 раза
  - B) увеличивается в 2 раза.
  - C) уменьшается в 4 раза
  - D) увеличивается в 4 раза.
  - E) увеличивается в 16 раз.
7. Найти период электромагнитных колебаний в контуре, изображенном на схеме.
  - A)  $T = 2\pi\sqrt{2(L_1 + L_2)C}$
  - B)  $T = 2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C/2}$



C)  $T = 2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C}$       D)  $T = 4\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C}$   
 E)  $T = 2\pi\sqrt{|L_1 - L_2|C}$

8. Найти период электромагнитных колебаний в контуре, изображенном на схеме.



A)  $T = 2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C}$       B)  $T = 2\pi\sqrt{\frac{2L_1L_2C}{L_1+L_2}}$

C)  $T = 2\pi\sqrt{\frac{L_1L_2C}{L_1+L_2}}$       D)  $T = 2\pi\sqrt{|L_1 - L_2|C}$

E)  $T = 4\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C}$

9. Закон изменения силы тока имеет вид  $I = 0,3 \cos(100\pi t + \pi/2)$ . Определите период изменения ( $Kл$ ) этого тока.

A) 1      B) 0,3      C) 0,03      D) 0,02      E) 0,01

10. Закон изменения заряда в колебательном контуре имеет  $q = 10^{-7} \cos 10^6 t$  ( $Кл$ ). Найти максимальное значение тока в контуре ( $мА$ ).

A) 1      B) 5      C) 10      D) 100      E) 1000

11. В контуре заряд колеблется по закону  $q = 10^{-3} \cos 100\pi t$ . Каково амплитудное значение силы тока ( $мА$ )?

A) 0,1      B) 1      C) 3,14      D) 31,4      E) 314.

12. Во сколько раз уменьшается энергия конденсатора в тот момент, когда после подключения заряженного конденсатора к катушке индуктивности проходит 1/6 периода генерируемых свободных колебаний? (Катушка не имеет активного сопротивления).

A) 6      B) 4      C) 3      D) 2

13. Проволочное кольцо площадью  $0,05 м^2$  с поверхностью  $I$   $Tл$  с индукцией будет вращаться с частотой  $5 Гц$  вокруг оси, перпендикулярной линиям индукции в однородном магнитном поле. Каково амплитудное значение индукции ЭДС, образующейся в кольце (В)?

A) 1,57      B) 2,5      C) 25      D) 31,4      E) 62,8

14. Ротор генератора переменного тока вращается в однородном магнитном поле. Во сколько раз увеличивается амплитуда индукционного ЭДС, если частота вращения ротора увеличивается в 4 раза?

A) не меняется      B) 2      C) 4      D) 8      E) 16

15. К цепи переменного тока подключается только резистор с активным сопротивлением. Чему равна разность фаз между напряжением и силой тока?

A)  $\pi$       B)  $\pi/3$       C) 0      D)  $\pi/2$

16. Конденсатор рассчитан на напряжение  $700 В$ . Как этот конденсатор можно подключить к сети переменного напряжения с максимальным эффективным значением (В)?

A) 350      B) 490      C) 500      D) 700      E) 980

17. При какой циклической частоте переменного тока емкостное сопротивление конденсатора емкостью  $200 нФ$  составит  $1 К\Omega$  ( $с^{-1}$ )?

A) 200      B) 500      C) 2500      D) 5000

18. Определите зависимость между силой тока  $I_1$  при параллельном подключении двух одинаковых конденсаторов к сети переменного тока и силой тока  $I_2$  при последовательном подключении.

A)  $I_2 = 4I_1$       B)  $I_2 = 2I_1$       C)  $I_2 = I_1$       D)  $I_1 = 4I_2$

19. К цепи переменного тока с частотой колебаний  $\omega$  подключен конденсатор емкостью  $C$ , а к цепи переменного тока с частотой колебаний  $5\omega$  - конденсатор емкостью  $C/2$ . Если напряжения в цепях равны, то каким будет отношение силы тока в первой цепи к силе тока во второй цепи?

A) 0,4      B) 2,5      C) 2/5      D)  $\sqrt{5/2}$

20. К катушке с индуктивностью  $0,2 Гн$  в подключен переменный ток частотой  $50 Гц$ , эффективное значение напряжения которого составляет  $220 В$ . Найти эффективное значение силы тока ( $A$ ). Катушка не имеет активного сопротивления.

A) 0,7      B) 3,5      C) 7      D) 14

21. Сколько будет индуктивность катушки, если вольтметр, подключенный к концам катушки, покажет  $31,4 В$ , а амперметр  $I$   $A$ ? Частота тока  $50 Гц$ . Катушка не имеет активного сопротивления.

A) 10      B) 0,4      C) 0,1      D) 0,01

22. Конденсатор емкостью  $100 мкФ$ , катушка индуктивностью  $200 мГн$  и резистор с сопротивлением  $60 Ом$  закон изменения тока в последовательно соединенных цепях имеет вид  $I = 8 \sin 100t$ . Насколько Ом равно полное сопротивление цепи?

A) 100      B) 360      C) 6400      D) 80

23. Катушка с индуктивным сопротивлением  $20 \text{ Ом}$ , конденсатор с емкостным сопротивлением  $20 \text{ Ом}$  и резистор с активным сопротивлением  $10 \text{ Ом}$  последовательно подключаются к цепи переменного тока с амплитудным значением напряжения  $300 \text{ В}$ . Каким будет амплитудное значение силы тока в цепи при резонансе (А)?  
 А) 30 В) 10 С) 12 Д) 15
24. Резистор и конденсатор подключаются последовательно к цепи переменного тока. Каким будет общее напряжение в сети (В), если вольтметр, подключенный к резистору, покажет  $60 \text{ В}$ , а вольтметр, подключенный к концам конденсатора, покажет  $80 \text{ В}$ ?  
 А) 20 В) 60 С) 80 Д) 100
25. Цепь переменного тока состоит из резистора с сопротивлением  $30 \text{ Ом}$ , катушки с индуктивным сопротивлением  $20 \text{ Ом}$  и конденсатора с емкостным сопротивлением  $10 \text{ Ом}$ . Если по цепи проходит ток  $2,5 \text{ А}$ , то сколько количество теплоты, выделяется из нее за  $4 \text{ с}$ ?  
 А) 500 В) 750 С) 1500 Д) 780 Е) 1000
26. Напряжение  $220 \text{ В}$  было подано на первую обмотку трансформатора. Каким будет напряжение на второй обмотке (В), если коэффициент трансформации равен  $0,8$ ?  
 А) 364 В) 275 С) 220 Д) 176
27. Трансформатор с  $600$  обмотками на первом витке выдает напряжение  $220 \text{ В}$ , повышая его до  $880 \text{ В}$ . Определите коэффициент трансформации и количество витков во второй обмотки.  
 А) 4; 2400 В) 4; 150 С) 0,25; 2400  
 Д) 0,25; 150 Е) 4; 300
28. Сколько процентов КПД трансформатора, если напряжение в первичной обмотке трансформатора  $200 \text{ В}$ , сила тока  $0,5 \text{ А}$ , во второй обмотке  $38 \text{ В}$  и  $2,5 \text{ А}$ ?  
 А) 70 В) 95 С) 80 Д) 86
29. Сколько длин волн монохроматического излучения с частотой  $6 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$  поместится в вакууме на  $1 \text{ м}$  отрезке?  
 А)  $2 \cdot 10^7$  В)  $2 \cdot 10^6$  С)  $3 \cdot 10^7$  Д)  $3 \cdot 10^8$  Е)  $6 \cdot 10^8$
30. Сколько Герц имеет частота колебаний электромагнитной волны с длиной волны  $30 \text{ см}$ , распространяющейся в вакууме?

- А)  $1 \cdot 10^9$  В)  $1,5 \cdot 10^9$  С)  $3 \cdot 10^9$  Д)  $1 \cdot 10^8$  Е)  $1,5 \cdot 10^8$
31. Какой будет период колебаний напряженности электрического поля (нс), если частота колебаний индукции магнитного поля в электромагнитной волне, распространяющейся в вакууме, равна  $10^7 \text{ Гц}$ ?  
 А) 300 В) 100 С) 10 Д) 7 Е) 3

32. Контур радиоприемника настроен на длину волны  $50 \text{ м}$ . Как изменить индуктивность катушки, чтобы настроить контур на длину волны  $25 \text{ м}$ ?  
 А) уменьшение в 2 раза Б) увеличение в 4 раза  
 В) уменьшение в 4 раза Г) увеличение в 2 раза

33. Емкость контура радиоприемника уменьшена с  $240$  до  $60 \text{ пФ}$ . Как изменится длина распространяющейся волны? Индуктивность такая же.  
 А) уменьшится в  $\sqrt{2}$  раза Б) увеличится в 2 раза  
 В) уменьшится в 4 раза Г) увеличится в 4 раза  
 Д) уменьшится в 2 раза

34. Если закон изменения силы тока в колебательном контуре радиоприемника имеет вид  $i = 10^{-6} \sin 2 \cdot 10^6 \pi t$  (А), то на какую длину волны он настроен (м)?  
 А) 1800 В) 1200 С) 600 Д) 300 Е) 200

#### ЗАДАНИЯ ПО ГЛАВЕ VI

- Сколько электрических колебаний возникает за  $1 \text{ мин}$  в колебательном контуре, состоящем из конденсатора емкостью  $100 \text{ мкФ}$  и катушки индуктивности емкостью  $10 \text{ мкГн}$ ? ( $\pi^2 = 10$ ).
- Какой емкостью (мкФ) конденсатор подключить к катушке с индуктивностью  $20 \text{ мГн}$ , чтобы создать в колебательном контуре колебание с периодом  $1 \text{ мс}$ ?  $\pi^2 = 10$ .
- Какой будет индуктивность катушки, если емкость конденсатора в идеальном контуре колебаний равна  $4 \text{ мкФ}$ , а циклическая частота колебаний равна  $500 \text{ рад/с}$ ?
- Максимальное значение заряда в контуре колебаний  $10^{-9} \text{ Кл}$ , период свободных колебаний  $3,14 \text{ мкс}$ . Какое амплитудное значение силы тока в контуре (мА)?
- Каково максимальное значение заряда конденсатора (нКл), если максимальное значение силы тока в контуре колебаний составляет  $3,14 \text{ мА}$ , а период колебаний -  $4 \text{ мкс}$ ?

6. Амплитудное значение заряда в обложках конденсатора колебательного контура равно  $2,5 \cdot 10^{-6}$  Кл, а амплитудное значение тока равно 3,14 мА. Какова частота электромагнитных колебаний в контуре?
7. Составьте уравнение колебаний напряжения в зажимах электрической цепи. Предположим, что амплитуда колебаний напряжения равна 150 В, период равен  $10^{-2}$  с, начальная фаза равна нулю, а напряжение равно нулю в момент  $t=0$ .
8. Напряжение  $U = U_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{12}\right)$  (В) изменяется по закону. Какое амплитудное значение напряжения (В), если напряжение в момент времени  $t=7/24$  равно 50 В?
9. Ток в колебательном контуре изменяется по закону  $I = 0,01 \cos 1000t$ . Какова индуктивность контура (мГн), если емкость конденсатора в нем равна  $25 \cdot 10^{-5}$  Ф?
10. В колебательном контуре сила тока изменяется по закону  $I = 0,01 \cos 1000t$  (А). Какова индуктивность (Гн) конденсатора колебательного контура, если его емкость составляет  $25 \cdot 10^{-5}$  Ф?
11. Длина Ротора электрогенератора 7 м, диаметр 1,25 м, частота вращения 3000 об/мин. Каково амплитудное значение индукции ЭДС (В), создаваемой обмоткой статора, если индукция магнитного поля равна 2 Тл?
12. При вращении проводочной рамки с сопротивлением 1 Ом в однородном магнитном поле магнитный поток, пересекающий рамку, изменяется по закону  $\Phi = 0,1 \cos 60t$  (Вб) Сколько ампер будет максимальное значение тока, генерируемого в рамке?
13. Генератор выдает в цепь 4,35 кВт. Какая разница фаз между силой тока и напряжением, если амплитуда силы тока равна 50 А, а амплитуда напряжения на зажимах генератора равна 200 В?
14. В цепи переменного тока напряжение изменяется по закону  $U = 400 \sin 100\pi t$  (В). Каково амплитудное значение силы тока в резисторе с сопротивлением 5 Ом (А)?
15. Каково амплитудное значение напряжения (В), если напряжение сети переменного тока, измеряемое вольтметром, равно 220 В?
16. Чему равно реактивное сопротивление ( $\Omega$ ) катушки индуктивностью 0,1 Гн, когда частота тока равна 1000 Гц?
17. Прибор, подключенный к цепи переменного тока, состоит из катушки, индуктивность которой равна L. При увеличении циклической частоты  $\omega$  два раза сопротивление прибора увеличивается в  $\sqrt{3}$  раза, то каково его активное сопротивление?
18. В цепи переменного тока последовательно соединяются катушка индуктивностью 50 мГн и конденсатор емкостью 20 мкФ. Найдти циклическую частоту (рад/с), при которой в цепи возникает резонанс.
19. К цепи переменного тока с циклической (круговой) частотой 300 рад/с последовательно подключаются резистор с сопротивлением 4 Ом и катушка с индуктивностью 10 мГн. Каково амплитудное значение напряжения на концах цепи (В), если амплитуда силы тока, проходящего через цепь, равна 50 А?
20. Сопротивление цепи переменного тока с циклической (круговой) частотой 10<sup>4</sup> рад/с составляет 100 Ом и конденсатор емкостью 1 мкФ соединены последовательно. Амплитуда внешнего напряжения в цепи 300 В. Какова амплитуда силы тока, проходящего через цепь (А)?
21. Первичная обмотка трансформатора имеет 840 витков. Сколько витков имеет во втором обмотке, если коэффициент трансформации равен 4,2?
22. Сколько Герц должно быть частота лучей, чтобы в вакууме разместить 2 10<sup>6</sup> волн монохроматического излучения в диапазоне 0,5 м?
23. Какова емкость конденсатора (нФ) в нем, если индуктивность колебательного контура, настроенного на ра длиной волны 1884 м, равна 2 мГн?

ОТВЕТЫ НА ТЕСТЫ

ГЛАВА I

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	C	C	B	D	A	A	D	B	D
1	D	A	B	B	A	A	D	C	B
2	D	B	A	B	D	D			

ГЛАВА II

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	B	C	D	A	B	A	B	E	C
1	D	C	E	A	E	B	A	C	B
2	D	E	D	C	D	C	B	D	A
3	E	A							

ГЛАВА III

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	A	A	C	D	A	C	C	A	A
1	C	B	B	C	C	D	C	C	B
2	A	B	D	D	A	A			

ГЛАВА IV

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	C	C	B	C	A	A	A	A	C
1	C	C	B	C	B	C	E	D	D
2	E	A	E	B	D	D	A	B	D

ГЛАВА V

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	C	B	D	B	B	B	B	D	C
1	A	A	A	C	A	C	D	D	B
2	B	B	A	D	A	B	A	E	D
3	D	C							

ГЛАВА VI

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	C	E	D	D	E	A	C	C	D
1	D	E	B	A	C	C	D	D	C
2	B	C	A	A	D	B	C	B	B
3	A	B	C	C	E	D			

ОТВЕТЫ НА ЗАДАНИЯ

ГЛАВА I

1. 3г; 2. Не изменится; 3. 0,9 мН; 4. 10 м/с<sup>2</sup>; 5. 2,5; 6. 12; 7. 0; 8. 100; 9. Возрастёт в 1,5 раз; 10. 36; 11. 0,1; 12. 900; 13. 360; 14. 10<sup>-5</sup>; 15. 9·10<sup>-7</sup>; 16. 6В; 17. 5·10<sup>6</sup>; 18. 6,8 кВ; 19. 2500; 20. 0,02; 21. 5·10<sup>-6</sup>; 22. 60°; 23. 3 раза; 24. 3 раза; 25. 3; 26. 2,8; 27. 5·10<sup>-5</sup>; 28. 0,08; 29. 40/13 мкФ; 13 мкФ; 30. 148 мкФ; 31. 315 мкФ; 32. C<sub>экв</sub>=8,44 мкФ; U<sub>1</sub>=8 В; U<sub>2</sub>=10 В; U<sub>3</sub>=18 В; 33. 45,13 мкФ

ГЛАВА II

1. 5·10<sup>6</sup>; 2. 6,8 кВ; 3. 2500; 4. 0,017; 5. 1500; 6. 3; 7. 10<sup>4</sup> га; 8. Уменьшена в 3 раза; 9. R/16; 10. 1,5 раза; 11. 0,1 Ом; 12. 3 раза; 13. 18; 14. 20 мин; 15. 1,5; 16. 1 А; 17. 0,4 Ом; 18. 30 А; 19. 110; 20. 0,285А; 21. 40А; 22. 0,02 Ом; 23. 3800 Ом; 24. В персом на 1,5 раз больше; 25. 4300 Вт; 19,6А; 26. 12м; 27. 60 Вт.

ГЛАВА III

1. 0,0329; 2. 2,4; 3. 5,4; 4. 0,2 А; 5. 1,3; 6. 3,3·10<sup>7</sup>; 7. 2,04 кВ/Кг; 8. 74 г; 9. 2·10<sup>6</sup> кВ/Кг; 10. 66; 11. 0,9; 12. 1,4·10<sup>5</sup> м<sup>3</sup>; 0,7·10<sup>5</sup> м<sup>3</sup>; 13. 37000 кВт·час; 14. 1,2·10<sup>4</sup> кВ/Кг; 15. 0,79 кВ; 16. 1,21·10<sup>4</sup> м; 17. ≈1,3·10<sup>2</sup> Ом; 1,3·10<sup>7</sup> Ом; 18. 9500 мсА; 19. 8,2 мА; 20. 10<sup>4</sup> эВ; 3 Вт; 1,9·10<sup>5</sup>; 21. 6,25·10<sup>20</sup>; 22. 800 В.

ГЛАВА IV

1. 30 мТл; 2. 1; 3. 0,4; 4. Возрастёт в 2 раза; 5. 6,4·10<sup>-12</sup>; 6. 10 мТл; 7. 10<sup>7</sup> м/с; 8. 0; 9. 10; 10. 90; 11. 0; 12. 5 Тл; 13. 0,1 Тл; 14. 60°; 15. 10<sup>-4</sup>; 16. 900В; 17. 200; 18. 0,6  $\frac{B_0}{\epsilon}$ ; 19. 0,2; 20. 0,4 А; 21. 3,14·10<sup>-2</sup> с; 22. 0,4В; 23. 1 В; 24. 0,2 Тл; 25. 16 м/с; 26. 1 м/с; 27. 1,5 Гц; 28. 1,6 мГн; 29. 0,5 Вб; 30. 5 А; 31. 0,15 В; 32. 1,2 Дж; 33. Каждую обмотку токоведущей пластины можно сравнить с магнитной пластиной. Эти пластины имеют одинаковые полюса с одной стороны и другие полюса со второй. Поэтому они стягиваются и пружина сжимается; 34. 15А; 35. 17°; 36. 0,2 Тл; 37. 3,2·10<sup>-9</sup> Кг; 38. 10<sup>5</sup> м/с<sup>2</sup>; 39. 0,5с; 5 А; 40. 0,1 В; 41. 50 В; 42. 64; 43. 7,1·10<sup>4</sup> Гн; 1,42·10<sup>-3</sup> Вб; 44. 399; 45. 1,55А.

ГЛАВА V

1. 10; 2.  $T = \frac{1}{8}c$ ; 3. 5 Гц; 4. 10; 5. 1 см; 6. 3,2 Гц; 7. 16; 8. 8; 9. 2; 10. 0,628; 11. 0,628 с; 12. 2,5 тт; 13. 2,5; 14. 10 с; 15. 3 с; 16. 4 м; 17. 2 м; 18. 6 с; 19. 2 м; 20.



340; 21. Возрастёт в 4,5 раз; 22. Возрастёт в 15 раз; 23. 1480т; 24. 1500 т;  
25. 3 мДж/м<sup>2</sup>; 26. 1500 м/с; 27. а) 336 Гц; б) 265 Гц; 28. 0,09.

### ГЛАВА VI

1. 9554 га; 2. 1,25; 3. 1 Гн; 4. 2 мА; 5. 2 нС; 6. 200 Гц; 7.  $U = 150 \sin 200\pi t$ ; 8.  
100 В; 9. 50; 10. 0,02; 11. 5500 В; 12. 6 А; 13. π6; 14. 40 А; 15. 310 В; 16.  
628; 17. ωl/√2; 18. 1000; 19. 250; 20. 1,5; 21. 200 га; 22.  $1,2 \cdot 10^5$  Гц; 23. 500  
нФ.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Единицы измерения физических величин в международной системе (СИ)

Название величины	Название	Обозначение	Единица измерения величины	
			Определение	4
1	2	3	4	
Длина	Метр	м	Принято, что длина волны излучения 1 650 763 730 метров в вакууме соответствует проходу между уровнями Криттон-86 21 <sub>10</sub> и 5д <sub>5</sub>	
Масса	Килограмм	кг	Принято, что масса международного прототипа составляет 1 кг.	
Время	Секунда	с	Цезий-133 считается 9 192 631 770 периодом облучения 1 секунда, соответствующим переходу между двумя чрезвычайно тонкими уровнями основного состояния атома	
Сила тока	Ампер	А	Две параллели, расположенные на расстоянии 1 метра друг от друга в вакууме, имеют бесконечную длину, а поперечное сечение представляет собой неизменяемую силу тока, которая при пропускании тока через очень маленькие проводники создает силу взаимодействия $2 \cdot 10^{-7}$ Н на метр длины проводника.	
Абсолютная температура	Кельвин	К	Доля 1/273,16 от термодинамической температуры, которая характеризуется тройную точку воды, считавшаяся 1 Кельвином.	
Количества вещества	Моль	моль	Углерод - элемент, равный числу атомов в массе 12 0,012 кг (атомный, молекулярный, ионный...) учитывалось количество вещества в системе, состоящее из 1 моли.	
Сила света	Кандела	Кд	Полный свет при температуре, равной температуре плавления платины под давлением 101325 Па - предпологается, что мощность света, излучаемого перпендикулярно от поверхности явора 1/6000000 м <sup>2</sup> , составляет 1 Канделу.	
Плоский угол	Радиан	рад	Центральный угол наклона к дуге, равный радиусу по длине, принимается за 1 радиан.	
Телесной Уголь	Стерadians	ср	Пространственный угол, при котором наконецник находится в центре сферы и отделяет поверхность, равную квадрату радиуса, от центра этой сферы, считается равным 1 стерадиану.	
Площадь	Квадрат метр	м <sup>2</sup>	1 м <sup>2</sup> - площадь квадрата, стороны которого имеют длину от 1 м	
Объем	Куб метр	м <sup>3</sup>	1 м <sup>3</sup> - длина ребер равна объему куба от 1 м.	
Скорость	Метр на секунду	м/с	Если материальная точка движется по прямой на расстоянии 1 м в точке 1 с, то его скорость равна 1 м/с.	
Ускорения	Метр на секунду квадрат	м/с <sup>2</sup>	Если материальная точка движущийся прямолинейно равноускоренно, изменяет свою скорость в точке 1с на 1 м/с, его ускорение равно 1 м/с <sup>2</sup>	

Угловая скорость	Радиан на секунду	рад/с	Если все точки тела, движущегося по окружности равномерно движением, вращаются со скоростью $\omega$ 1 с до 1 рад, его угловая скорость равна 1 рад/с.
Плотность	Килограмм на кубический метр	кг/м <sup>3</sup>	1 кг/м <sup>3</sup> - плотность такого однородного вещества, что масса 1 м <sup>3</sup> объема, отделенного от этого вещества, составляет 1 кг.
Импульс	Килограмм метр на секунду	кг·м/с	1 кг·м/с - импульс материальной точки массой 1 кг со скоростью 1 м/с.
Момент импульса	Килограмм квадрат метр на секунду	кг·м <sup>2</sup> /с	1 кг·м <sup>2</sup> /с - это импульсный вращающийся момент материальной точки, импульс которой, движущийся по окружности 1 м, составляет 1 кг·м/с.
Сила	Килограмм метр на секунду	Н	1 Н - изменяющая за 1 секунду скорость тела массой 1 кг на 1 м/с в направлении действия силы.
Сила момента	Нютон метр	Н·м	1 Н·м - момент силы, значение которого равно 1 Н относительно точки на расстоянии 1 м на линии действия силы.
Сила импульса	Нютон секунда	Н·с	1 Н·с - импульс силы 1 Н, действующей в течение 1 секунды.
Давления	Паскаль	Па	1 Па - давление, оказываемое на поверхность площадью 1 м <sup>2</sup> перпендикулярно направлению силы.
Коэффициент поверхностной плотности	Нютон на метр	Н/м	1 Н/м - поверхностное натяжение жидкости, что сила 1 Н влияет на длину контура 1 м, что ограничивает свободную поверхность жидкости.
Работа (энергия)	Джоуль	Дж	1 Дж - работа, выполняемая при воздействии силы 1 Н в направлении силы, перемещает тело на расстоянии 1 м.
Мощность	Ватт	Вт	1 Вт - производительность машины, которая может выполнить 1 Дж работы в течение 1 секунды.
Температура Цельсий	Градус Цельсий	°С	В пересчете на шкалу Цельсия это равно Кельвину.
Количества теплота	Джоуль	Дж	1 Дж - количество теплота, эквивалентное механической операции, размер которой составляет 1 Дж.
Теплоемкость	Джоуль на Кельвин	Дж/К	1 Дж/К - теплоемкость системы, что когда этой системе дается количество теплота 1 Дж, ее температура повышается до 1 К.
Удельное теплоемкость	Джоуль на килограмм Кельвин	Дж/(кг·К)	1 Дж/(кг·К) - удельная теплоемкость тела, на теплоемкость 1 Дж/К массы 1 кг
Количества заряды	Кулон	Кл	1 Кл - величина электрического заряда, прошедшего за 1 с поперечного сечения, равна 1 А.
Напряженность электрического поля	Вольт на метр	В/м	1 В/м - разность потенциалов двух точек расположенных на расстоянии 1 м друг от друга вдоль линии электропередачи, что одинаковое напряжение электрического поля составляет 1 В на заряд 1 Кл, включенный в такую область, влияет

Электрическая индукция (смещения)	Кулон на квадрат метр	Кл/м <sup>2</sup>	1 Кл/м <sup>2</sup> - площадь представляет собой электрическую индукцию, в которой электрический поток индукции, равный 1 Кл, проходит через поперечное сечение 1 м <sup>2</sup> .
Магнитная индукция	Тесла	Тл	1 Тл - площадь представляет собой магнитную индукцию, при которой магнитный поток, равный 1 Вб, проходит через поперечное сечение 1 м <sup>2</sup> .
Напряженность магнитного поля	Ампер на метр	А/м	1 А/м - напряженность магнитного поля, что магнитная индукция в этой точке составляет 4π·10 <sup>-7</sup> Тл.
Магнитный поток	Вебер	Вб	1 Вб - магнитный поток пропускает заряд 1 Кл с поперечного сечения электрической цепи, электрическое сопротивление которой равно 1 Ом, которое поддерживается этим магнитным потоком.
Индуктивность	Генри	Гн	1 Гн - индуктивность проводника, что при прохождении через него тока 1 А полный магнитный поток, равен 1 Вб.
Электрическое сопротивление	Ом	Ом	1 Ω - электрическое сопротивление проводника, пропускающего ток 1 А, когда разность потенциалов на двух концах составляет 12 В.
Электрическое напряжение	Вольт	В	1 В - напряжение в потребляемой части питания 1 В электрических цепи с постоянным током 1 А.
Электрическая емкость	Фарад	Ф	1 Ф - это электрическая емкость проводника, которая увеличивается до 1 В при зарядке 1 Кл.
Удельное электрическое сопротивление	Ом·метр	Ом·м	1 Ω·м - поперечное сечение 1 м <sup>2</sup> , удельное электрическое сопротивление проводника, которое будет иметь электрическое сопротивление 1 Ом при длине 1 м.
Частота	Герц	Гц	1 Гц - означает одно исполнение (реализацию) такого процесса за одну секунду; другими словами - одно колебание в секунду.
Световой поток	Люмен	Лм	1 Лм - Один люмен равен световому потоку, исходящему от точечным изотропным источником, с силой света, равной одной канделе, в телесный угол величинной в один стерadian (1 лм = 1 кл × ср).
Световая энергия	Люмен·секунда	Лм·с	1 Лм·с - Характеризует способность энергии, переносимой светом, вызывать у человека зрительные ощущения.
Светимость	Кандела на квадрат метр	Кд/м <sup>2</sup>	1 Кд/м <sup>2</sup> - мощность света, которая распределяет свет с 1 м <sup>2</sup> поверхности, что составляет 1 Кд.
Яркость	Люмен на квадрат метр	Лм/м <sup>2</sup>	1 Лм/м <sup>2</sup> - это яркость поверхности площадью 1 м <sup>2</sup> , которая излучает световой поток 1 Лм
Освещенность	Люкс	Лк	1 Лк - освещенности поверхности площадью 1 м <sup>2</sup> при световом потоке падающего на нее излучения, равном 1 Лм.

Удельное сопротивление металлов и сплавов ( $\rho$ ) ( $20^{\circ}\text{C}$ ) и температурный коэффициент сопротивления ( $\alpha$ )

Вещество	$\rho, \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{м}$	$\alpha, \text{K}^{-1}$	Вещество	$\rho, \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{м}$	$\alpha, \text{K}^{-1}$
Алюминий	2.8	0.0042	Нихром	110	0.0001
Вольфрам	5.5	0.0048	Свинец	21	0.0037
Вый	7.1	0.001	Серебро	1.6	0.004
Железо	1.7	0.0043	Сталь	12	0.006
Мель	42	0.0001			
Никель					

Электрохимические эквиваленты, мг/Кл

Алюминий ( $\text{Al}^{3+}$ )	0.093	Мель	( $\text{Cu}^{2+}$ )	Серебро ( $\text{Ag}^+$ )	1.12
Водород ( $\text{H}^+$ )	0.0104	0.33	0.62	Хром ( $\text{Cr}^{3+}$ )	0.18
Кислород ( $\text{O}^{2-}$ )	0.083	Олово ( $\text{Sn}^{2+}$ )	( $\text{Ni}^{2+}$ )	Цинк ( $\text{Zn}^{2+}$ )	
		Никель	0.34		
		0.30			

Работа выхода электронов, эВ

Вольфрам	4.5	Оксид бария	1.0	Цинк	4.2
Калий	2.2	Платина	5.3		
Литий	2.4	Серебро	4.3		

Показатель преломления (для видимых лучей)

Алмаз	2.4	Лед	1.31	Стекло	1.6
Вода	1.3	Сернистый углерод			
Воздух	1.00029	Этиловый спирт 1.36			

Доли единицы измерения

	$10^{12}$	Дека, да	$10$	Нано, н	$10^{-9}$
Тера, Т	$10^9$	Деци, д	$10^{-1}$	Пико, п	$10^{-12}$
Гига, Г	$10^6$	Санти, см	$10^{-2}$	Фемто, ф	$10^{-15}$
Мега, М	$10^3$	Милли, м	$10^{-3}$	Атто, а	$10^{-18}$
Кило, к	$10^2$	Микро, мк	$10^{-6}$		
Гекто, г					

Постоянные

Ускорение свободного падения на поверхности Земли	$g = 9.81 \text{ м/с}^2$		
Постоянная гравитации	$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$		
Постоянная Авогадро	$N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ мол}^{-1}$		
Постоянная Больцмана	$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Ж/К}$		
Универсальная газовая постоянная	$R = 8.31 \text{ Ж/(мол} \cdot \text{К)}$		
Атомная единица массы	$1 \text{ а.е.м.} = 1.66113 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$		
Число Лошмидта	$N_H = N_A / V_0 = 2.686 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$		
1 моль объема газа при нормальных условиях	$V_0 = 22.414 \text{ л/мол}$		
Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$		
Постоянная Кулона	$k = 9 \cdot 10^9 \text{ Нм}^2 / \text{Кл}^2$		
Электрометрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$		
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$		
Число Фарадея	$F = 96500 \text{ Кл/мол}$		
Удельная заряд электрона	$q/m_e = 1.7588 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$		
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$		
Постоянная Вина	$b = 2898 \text{ м} \cdot \text{К}$		
Постоянная Планка	$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Ж} \cdot \text{с}$		
Постоянная Ридберга	$R = 3.293 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$		
Масса электрона в покое	$m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5.484 \cdot 10^{-4} \text{ м.а.б}$		
Масса протона в покое	$m_p = 1.672 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1.00759 \text{ м.а.б}$		
Масса нейтрона в покое	$m_n = 1.675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1.00899 \text{ м.а.б}$		
Масса нейтрона в покое	$W_{0,n} = 8.2 \cdot 10^{-14} \text{ Ж} = 0.512 \text{ МэВ}$		
Энергия электрона в покое	$W_{0,e} = 1.505 \cdot 10^{-10} \text{ Ж} = 939 \text{ МэВ}$		
Энергия протона в покое	$W_{0,p} = 1.508 \cdot 10^{10} \text{ Ж} = 941 \text{ МэВ}$		
Энергия нейтрона в покое	$934 \text{ МэВ}$		
Энергия, соответствующая 1 а.е.м.	$m_p = 1836 \cdot m_e$	$m_n = 1838.5 \cdot m_e$	
Масса протонов и нейтронов (в электронном единицах)			

Поверхность и объем

Поверхность	Объем
$1 \text{ мм}^2 = 10^{-6} \text{ м}^2$	$1 \text{ мм}^3 = 10^{-9} \text{ м}^3 = 10^{-6} \text{ л}$
$1 \text{ см}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$	$1 \text{ см}^3 = 10^{-6} \text{ м}^3 = 10^{-3} \text{ л}$
$1 \text{ дм}^2 = 10^{-2} \text{ м}^2$	$1 \text{ дм}^3 = 10^{-3} \text{ м}^3 = 1 \text{ л}$
$1 \text{ га} (1 \text{ гектар} = 100 \text{ соток}) = 10000 \text{ м}^2$	$1 \text{ км}^3 = 10^9 \text{ м}^3 = 10^{12} \text{ л}$

Молярная масса некоторых веществ [кг/моль]

Атом кислорода (O)	16·10 <sup>-3</sup>	Пропан (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	44·10 <sup>-3</sup>
Молекула кислорода (O <sub>2</sub> )	32·10 <sup>-3</sup>	Гелий(He)	4·10 <sup>-3</sup>
Атом водорода (H)	1·10 <sup>-3</sup>	Железо(Fe)	56·10 <sup>-3</sup>
Молекула водорода (H <sub>2</sub> )	2·10 <sup>-3</sup>	Алюминий(Al)	27·10 <sup>-3</sup>
Атом азота (N)	14·10 <sup>-3</sup>	Цинк (Zn)	65,4·10 <sup>-3</sup>
Молекула азота (N <sub>2</sub> )	28·10 <sup>-3</sup>	Олово (Sn)	119·10 <sup>-3</sup>
Атом хлора (Cl)	35,5·10 <sup>-3</sup>	Свинец (Pb)	207,2·10 <sup>-3</sup>
Молекула хлора (Cl <sub>2</sub> )	70·10 <sup>-3</sup>	Ртуть (Hg)	201·10 <sup>-3</sup>
Углекислый газ (CO <sub>2</sub> )	44·10 <sup>-3</sup>	Медь (Cu)	63,6·10 <sup>-3</sup>
Аргон (Ar)	40·10 <sup>-3</sup>	Литий (Li)	7·10 <sup>-3</sup>
Углекислый газ (CO)	28·10 <sup>-3</sup>	Золото (Au)	200·10 <sup>-3</sup>
Вода(H <sub>2</sub> O)	18·10 <sup>-3</sup>	Серебро (Ag)	108·10 <sup>-3</sup>
Метан(CH <sub>4</sub> )	16·10 <sup>-3</sup>	Уран (U)	238·10 <sup>-3</sup>
Этан(C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	30·10 <sup>-3</sup>	Воздух	29·10 <sup>-3</sup>

Некоторые величины не входящие в СИ

1 м/с = 3,6 км/човат	1 Дж = 1/4,2 кал.	1 сутка = 86400 сек.
1 км/чав = 1/3,6 м/с	1 кВт·чав = 3,6 МДж	1 мм·рут. стб = 133,32 Па
1 лоша. сила = 736 Вт	1 эВ = 1,6·10 <sup>-19</sup> Дж	1 астр. едн. = 1,5·10 <sup>9</sup> м
1 кВт = 1,36 лоша. сила	1 ДДж = 6,25·10 <sup>18</sup> эВ	1 световой год = 9,5·10 <sup>15</sup> м
1 кал. = 4,2 Дж	1 г/см <sup>3</sup> = 1000 кг/м <sup>3</sup>	1 Парсек = 3,1·10 <sup>16</sup> м

Функции измерительных приборов

Гигрометр---относительная влажность	Амперметр---сила тока
Гигрометр---точка роса	Вольтметр---напряжения
Болометр---температура металлов	Гальванометр---сила тока и напряжения
Термометр---температура	Электрометр---зарядов и составляет разность потенциалов.
Ареометр---плотность жидкости	Электроскоп---количества зарядов
Анероид барометр---атмосферное давление	Тахометр---вращательный момент
Ртутная барометр--- атмосферное давление	Статометр--- коэффициент поверхностного натяжения
Монометр--- давление газа в сосуде	Вязкозиметр---вязкость
Динамометр---сила	
Алтметр---высота (в самолётах)	

D.I.Mendeleevning elementlar davriy sistemasi																		VII (H)		VIII		Nisbiy atom massasi		Elementning belgilanishi																	
1	1															9	F	10	Ne	12,01		6	C																		
2	2															18,00	ФТОР	20,18	НЕОН	12,01		6	C																		
3	3															35,45	17 Cl	36,95	18 Ar	12,01		6	C																		
4	4															79,90	35 Br	83,80	36 Kr	12,01		6	C																		
5	5															126,90	53 I	131,30	54 Xe	12,01		6	C																		
6	6															182,22	86 Rn	12,01		6	C																				
7	7															208,98	84 Po	12,01		6	C																				
8	8															209	85 At	12,01		6	C																				
9	9															210	86 Rn	12,01		6	C																				
10	10															210	87 Fr	12,01		6	C																				
* Lantanooidlar																																									
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	Ce 140,12		Pr 140,91		Nd 144,24		Pm (145)		Sm 150,40		Eu 151,96		Gd 157,25		Tb 158,93		Dy 162,50		Ho 164,93		Er 167,26		Tm 168,93		Yb 173,04		Lu 174,97	
** Aktinooidlar																																									
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	Th 232,04		Pa 231,04		U 238,03		Np 237,05		Pu 244		Am 243		Cm 247		Bk 247		Cf 251		Es 254		Fm 257		Md 258		(No) 255		(Lr) 256	

### Тригонометрические тождества

1. $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$	4. $\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \alpha = 1$
2. $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$	5. $1 + \operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{1}{\cos^2 \alpha}$
3. $\operatorname{ctg} \alpha = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha}$	6. $1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha = \frac{1}{\sin^2 \alpha}$

### Формулы сложения и вычитания

1. $\begin{cases} \sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta \\ \sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta - \cos \alpha \cdot \sin \beta \end{cases}$	2. $\begin{cases} \cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta - \sin \alpha \cdot \sin \beta \\ \cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta + \sin \alpha \cdot \sin \beta \end{cases}$
3. $\begin{cases} \operatorname{tg}(\alpha + \beta) = \frac{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}{1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta} \\ \operatorname{tg}(\alpha - \beta) = \frac{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta}{1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta} \end{cases}$	4. $\begin{cases} \operatorname{ctg}(\alpha + \beta) = \frac{\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta - 1}{\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \beta} \\ \operatorname{ctg}(\alpha - \beta) = \frac{\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta + 1}{\operatorname{ctg} \beta - \operatorname{ctg} \alpha} \end{cases}$

### Формулы двойного угла

1. $\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha$	2. $\cos 2\alpha = \begin{cases} \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \\ 2 \cos^2 \alpha - 1 \\ 1 - 2 \sin^2 \alpha \end{cases}$
3. $\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha}$	4. $\operatorname{ctg} 2\alpha = \frac{\operatorname{ctg}^2 \alpha - 1}{2 \operatorname{ctg} \alpha}$

### Формулы сложения и вычитания синусов и косинусов

1. $\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$	3. $\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$
2. $\sin \alpha - \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha - \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha + \beta}{2}$	4. $\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$

### Формулы умножения синусов и косинусов

1. $\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} \cdot [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$
2. $\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} \cdot [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)]$
3. $\sin \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} \cdot [\sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta)]$

### Таблица производных по математике

Простые функции	Сложные функции
$(kx + b)' = k$	$(kx + b)' = k \cdot u'$
$(x^n)' = n \cdot x^{n-1}$	$(u^n)' = n \cdot u^{n-1} \cdot u'$
$\left(\frac{1}{x}\right)' = -\frac{1}{x^2}$	$\left(\frac{1}{u}\right)' = -\frac{1}{u^2} \cdot u'$
$(\sin x)' = \cos x$	$(\sin u)' = \cos u \cdot u'$
$(\cos x)' = -\sin x$	$(\cos u)' = -\sin u \cdot u'$
$(\operatorname{tg} x)' = \frac{1}{\cos^2 x}$	$(\operatorname{tg} u)' = \frac{1}{\cos^2 u} \cdot u'$
$(\operatorname{ctg} x)' = -\frac{1}{\sin^2 x}$	$(\operatorname{ctg} u)' = -\frac{1}{\sin^2 u} \cdot u'$
$(\arcsin x)' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$	$(\arcsin u)' = \frac{1}{\sqrt{1-u^2}} \cdot u'$
$(\arccos x)' = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$	$(\arccos u)' = -\frac{1}{\sqrt{1-u^2}} \cdot u'$
$(\operatorname{arctg} x)' = \frac{1}{1+x^2}$	$(\operatorname{arctg} u)' = \frac{1}{1+u^2} \cdot u'$
$(\operatorname{arccctg} x)' = -\frac{1}{1+x^2}$	$(\operatorname{arccctg} u)' = -\frac{1}{1+u^2} \cdot u'$
$(e^x)' = e^x$	$(e^u)' = e^u \cdot u'$
$(a^x)' = a^x \cdot \ln a$	$(a^u)' = a^u \cdot \ln a \cdot u'$
$(\ln x)' = \frac{1}{x}$	$(\ln u)' = \frac{1}{u} \cdot u'$
$(\log_a x)' = \frac{1}{x \cdot \ln a}$	$(\log_a u)' = \frac{1}{u \cdot \ln a} \cdot u'$

Простые функции	Сложные функции
$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C$	$\int (kx+b)^n dx = \frac{1}{k} \cdot \frac{(kx+b)^{n+1}}{n+1} + C$
$\int \frac{dx}{\sqrt{x}} = 2\sqrt{x} + C$	$\int \frac{dx}{\sqrt{kx+b}} = \frac{2}{k} \cdot \sqrt{kx+b} + C$
$\int \sin x dx = -\cos x + C$	$\int \sin(kx+b) dx = -\frac{1}{k} \cdot \cos(kx+b) + C$
$\int \cos x dx = \sin x + C$	$\int \cos(kx+b) dx = \frac{1}{k} \cdot \sin(kx+b) + C$
$\int \frac{dx}{\cos^2 x} = \operatorname{tg} x + C$	$\int \frac{dx}{\cos^2(kx+b)} = \frac{1}{k} \cdot \operatorname{tg}(kx+b) + C$
$\int \frac{dx}{\sin^2 x} = -\operatorname{ctg} x + C$	$\int \frac{dx}{\sin^2(kx+b)} = -\frac{1}{k} \cdot \operatorname{ctg}(kx+b) + C$
$\int \operatorname{tg} x dx = -\ln \cos x  + C$	$\int \operatorname{tg}(kx+b) dx = -\frac{1}{k} \cdot \ln \cos(kx+b)  + C$
$\int \operatorname{ctg} x dx = \ln \sin x  + C$	$\int \operatorname{ctg}(kx+b) dx = \frac{1}{k} \cdot \ln \sin(kx+b)  + C$
$\int \frac{dx}{x} = \ln x  + C$	$\int \frac{dx}{kx+b} = \frac{1}{k} \cdot \ln kx+b  + C$
$\int e^x dx = e^x + C$	$\int e^{kx+b} dx = \frac{1}{k} \cdot e^{kx+b} + C$
$\int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \arcsin x + C$	$\int \frac{dx}{\sqrt{a^2-x^2}} = \arcsin \frac{x}{a} + C$
$\int \frac{dx}{1+x^2} = \operatorname{arctg} x + C$	$\int \frac{dx}{a^2+x^2} = \frac{1}{a} \cdot \operatorname{arctg} \frac{x}{a} + C$
$\int \frac{dx}{\sin x} = \ln \left  \frac{x}{2} \right  + C$	$\int \frac{dx}{\sin(kx+b)} = \frac{1}{k} \cdot \ln \left  \frac{kx+b}{2} \right  + C$
$\int \frac{dx}{\cos x} = \ln \left  \operatorname{tg} \left( \frac{x}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right  + C$	$\int \frac{dx}{\cos(kx+b)} = \frac{1}{k} \cdot \ln \left  \operatorname{tg} \left( \frac{kx+b}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right  + C$

Основная литература

1. М.Х.О'Имасова. Механика ва молекуляр физика, академик йишлар учун о'quv qo'llanma, 1-kitob. "O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 2004, 433 b.
2. М.Х.О'Имасова. Электродинамика asoslari, teparishlar va to'laqlar, akademik йишлар учун о'quv qo'llanma, 2-kitob. "O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 2004, 360 b.
3. М.Х.О'Имасова. Optika, atom va yadro fizikasi, akademik йишлар учун о'quv qo'llanma, 3-kitob. "Cho'iron" nashriyoti. Toshkent.: 2010, 384 b.
4. Axmedov Sh. B., Dushmanov M.B. "Fizika (1-qism)", akademik йиш о'quvchilari uchun darslik. Navro'z nashriyoti. Toshkent.: 2019, 435-b.
5. Axmedov Sh. B., Dushmanov M. B. "Fizika (2-qism)", akademik йиш о'quvchilari uchun darslik. Navro'z nashriyoti. Toshkent.: 2019, 470-b.
6. A.S.Nu'monxo'jayev, R.Y.Komilova, K.A.Tursumetov, A.X.Yunusov, B.Normatov, A.M.Xudoyberganov. Fizika, ma'ruzalar matni, akademik йишлар uchun qo'llanma, 2-qism. "O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 2003, 415 b.
7. A.S.Nu'monxo'jayev, K.A.Tursumetov, A.M.Xudoyberganov, M.A.Fatxov, B.Normatov, N.A.Nurmatov. Fizika, ma'ruzalar matni, akademik йишлар uchun qo'llanma sifatida tavsiya etilgan, 3-qism. "O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 2001, 352 b.
8. A.G.G'aniyev, A.K.Avilvoroqulov, G.A.Almardonova. Fizika (akademik йиш va kasb hunar kollejlari uchun), 1-qism. "O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 2002, 368 b.
9. A.G.G'aniyev, A.K.Avilvoroqulov, G.A.Almardonova. Fizika (akademik йиш va kasb hunar kollejlari uchun), 2-qism. "O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 2003, 192 b.
10. N.M.Shaxmurov, S.N.Shaxmurov, D.Sh.Shodiyev. Fizika, 10-sinf. O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 1993, 238b.
11. G.YA.Myakishov, I.B.Buxovsev. Fizika, uchebnik dlya 10 klassa sredney shkoi. -M.: Prosveshenie, 1990.-223 s.
12. G.Ya.Myakishov, B.B.Buxovsev. Fizika, 11-sinf. "O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 1996, 304 b.
13. M.Muhidinov, Sh.Ahmedov, B.Qulimurotov. Fizikadan testlar va ularning yechimi, oliy o'quv yurtlariga kiruvchi abituriyentlar uchun qo'llanma, 1-qism. "O'zbekiston" nashriyoti. Toshkent.: 2016, 423 b.
14. M.B.Dushmanov. Fizika (oliy ta'lim muassasalariga kiruvchilar uchun qo'llanma). Nizomiy nomidagi TDPU bosmaxobasi. Toshkent.: 2016, 521 b.
15. A.Qosimov, X.Jo'raqulov, A.Safarov. Fizika kursi, mexanika, 1-qism. "O'zbekiston" nashriyoti. Toshkent.: 1994, 320 b.
16. A.P.Rimkevich. Fizikadan masalalar to'plami. "O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 1993.
17. K.A.Tursumetov, A.A.Uzgov, I.Bo'riboev, A.M.Xudoyberganov. Fizikadan masalalar to'plami. "O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 2001, 256 b.

18. O' Q. Nazarov, X.Z. Iktomova, K.A. Tursumetov. Ushinchi fizika kursi (Mexanika va molekulyar fizika). "O'zbekiston" nashriyoti. Toshkent.: 1992, 280b.
19. O' R. Egamov, O' Egamov. Fizika, davrlik. "Aloqachil" nashriyoti. Toshkent.: 2013, 507b.

#### Дополнительная литература

1. Сборник задач по физике. Часть I. Ш. Б. Ахмедов, С. Г. Талжи-Аглаева, Ш. А. Низамутдинова, Н. З. Колдиров. Toshkent.: 2019.
2. Сборник задач по физике. Часть II. Ш. Б. Ахмедов, С. Г. Талжи-Аглаева, Ш. А. Низамутдинова, Н. З. Колдиров. Toshkent.: 2019.
3. Нойтс В. I. Fizika. 2008. "Fan" nashriyoti.
4. Usmanov M. Fizikadan masalalar to'plami (Oliy o'quv yurtlariga kirituvchilar uchun). Navro'z nashriyoti. Toshkent.: 2018. 558-b.
5. Uzodov A. Fizikadan testlar to'plami (Oliy o'quv yurtlariga kirituvchilar uchun). "Yangi Asr" nashriyoti. Toshkent.: 2017. 311-b.
6. Abdurent (1-8). "Spectrum media group". Toshkent.: 2018. 311-b.
7. Chotiev R. va boshqalar. O'ta maxsus Kasb-hunar talimi muassasalarida laboratoriya ishlari. T. "Taldin" 2002
8. Suyatov Q. T. va boshqalar. Mexanika va molekulyar fizika - T.: "O'qituvchi", 2002.
9. Xusanov A. X. va boshqalar. Elektrodinamika. Elektromagnit tebranishlar. - T.: "O'qituvchi", 2003.
10. Suyatov Q. T. va boshqalar. Fizikadan laboratoriya va namoyishi tajriba ishlari. - T.: "Taldin", 2002.
11. Suyatov Q. T. va boshqalar. Fizika. I kitob. Mexanika. - T.: "Yangi nashr", 2009.
12. Suyatov Q. T., Usmonov Sh., Usatov J. Fizika. II kitob. Molekulyar fizika. - T. "Yangi nashr", 2010.
13. Физика часть I. «Механика. Молекулярная физика, термодинамика» Т. М. Оглачко, К. А. Турмунетов.
14. Физика часть II. «Электродинамика. Оптика. Атомная физика» Т. М. Оглачко, К. А. Турмунетов.
15. Juraev U.B., Usatov A. M., Qo'uroqov X. R. Fizika. I-qism. SamDU tahtit'y-nashriyot. 2020.
16. Juraev U. B., Usatov A. M., Qo'uroqov X. R. Fizika. II-qism. SamDU tahtit'y-nashriyot. 2020.
17. Turdiyev N. Sh. va boshqalar. Fizika 10-sinf darsligi. "Niso roliqra" Toshkent: 2017.
18. Turdiyev N. Sh. va boshqalar. Fizika 11-sinf darsligi. "Niso roliqra" Toshkent: 2018.

19. A. A. Корнев, А. А. Паско, А. А. Варганов. Maple v injenernyx raschetax. Tambovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet. - Tambov.: 2003
20. Primqulova, R. Turqunbaev, G. Eshchilanova, Sh. Ismailov. Maple da matematik masalalarni yechish metodlari (metodik qo'llanma). Nizomiy nomidagi Toshkent pedagogika Universiteti. Toshkent.: 2009.
21. A. V. Pogorelov. Geometriya. 7-11 sinflar. "O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 1992.
22. D. Djankoli. Fizika, 1-chast. Izdatelstvo "Mir". Moskva.: 1989, 656 s.
23. D. Djankoli. Fizika, 2-chast. Izdatelstvo "Mir". Moskva.: 1989, 673s.
24. A. N. Remizov, A. Ya. Rotarenko. Kurs fiziki. OOO «Drofa». Moskva.: 2002, 720 s.

25. Ronald J. Weirshberger, James J. Reynolds. Calculus with Applications, the 2<sup>nd</sup> edition. Lexington, Massachusetts.: Copyright © 1993 by D. C. Heath and Company.

26. Halliday & Resnick. Principles of physics. Cleveland state university. Cover image from © M. Darlusch/Shutterstock, 9<sup>th</sup> edition. 2011. 1248 pages.

#### Электронные ресурсы

1. 10 класс. Физика. Механика. Г. Я. Мякишев.
2. 11 класс. Физика. Оптика квантовая физика. Г. Я. Мякишев.
3. 10 класс. Физика. В. А. Касьянов.
4. 11 класс. Физика. В. А. Касьянов.
5. Nigmatov J. va boshqalar. Fizikadan laboratoriya ishlari. T.: "O'qituvchi", 2002.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b>	3
<b>ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ</b>	5
<b>ГЛАВА I. ЭЛЕКТРОСТАТИКА</b>	6
§ 1. Различные электрические явления. Закон сохранения электрического заряда	6
§ 2. Закон взаимодействия зарядов – закон Кулона	17
§ 3. Принципы взаимодействия. Электрическое поле, его силовые линии. Напряженность электрического поля.	24
§ 4. Напряженность электрического поля заряженных проводников различной формы.	32
§ 5. Проводник и диэлектрик, вводимые в электрическое поле.	45
§ 6. Потенциал электрического поля. Работа, выполняемая при перемещении точечного заряда. Потенциальная энергия.	55
§ 7. Потенциалы заряженных проводников. Эквипотенциальные поверхности. Частные случаи для потенциальных.	61
§ 8. Электрическая емкость. Конденсаторы и их виды. Энергия конденсатора. Плотность энергии электрического поля.	78
§ 9. Последовательное и параллельное подключение конденсаторов. Частные случаи для конденсатора	86
Тесты по главе I	102
Задачи по главе I	105
<b>ГЛАВА II. ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА</b>	109
§ 10. Электрический ток. Электрическое сопротивление. Закон Ома для участка цепи	109
§ 11. Дрейфовое движение и напряженность электрического поля внутри проводника с током. Зависимость электрического сопротивления от температуры	119
§ 12. Последовательное и параллельное соединение электрических сопротивлений	125
§ 13. Электроизмерительные приборы. Увеличение пределов измерений электроизмерительных приборов	133
§ 14. Работа электрического тока. Закон Джоуля-Ленца. Электрическая мощность	139
§ 15. Закон Ома для полной цепи. Закон Джоуля-Ленца для полной цепи	152
§ 16. Последовательное и параллельное подключение источников постоянного тока	163
§ 17. Законы Кирхгофа для электрических цепей и вытекающие из них	168

результаты	176
Лабораторные работы по главе II	185
Тесты по главе II	189
Задачи к главе II	192
<b>ГЛАВА III. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ</b>	192
§ 18. Электрический ток в жидкостях. Законы Фарадея для электролиза	197
§ 19. Гальванический элемент. Элемент Даниэля. Аккумуляторы.	202
§ 20. Электрический ток в полупроводниках	212
§ 21. Электрический ток в вакууме	217
§ 22. Электрический ток в газах. Газовые разряды и его виды	224
Лабораторные работы по главе III	226
Тесты по главе III	229
Задачи к главе III	232
<b>ГЛАВА IV. МАГНЕТИЗМ</b>	232
§ 23. Магнитные явления. Опыт, доказывающие существование магнитного поля	232
§ 24. Сила тока и его направление. Правило левой руки. Взаимодействие параллельных токов.	246
§ 25. Магнитный момент, вращающий момент и потенциальная энергия контура тока в магнитном поле. Работа, выполняемая при вращении токарного контура.	253
§ 26. Закон Био-Савара-Лапласа и вытекающие из него результаты	258
§ 27. Понятие о циркуляции поля. Закон Ампера. Магнитное поле соленоида и тороида.	267
§ 28. Сила Лоренца. Траектория заряженной частицы в магнитном поле	276
§ 29. Вектор намагниченности. Напряженность магнитного поля. Магнитная восприимчивость против магнитного поглощения	282
§ 30. Магнетики и их виды	288
§ 31. Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции. Правило Ленца	292
§ 32. Закон электромагнитной индукции и его различные реализации	298
§ 33. Явление самоиндукции. Индуктивность катушки-это энергия магнитного поля. Явление взаимной индукции	308
Лабораторные работы по главе IV	317
Тесты по главе IV	319
Задачи к главе IV	323
<b>ГЛАВА V. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ</b>	328
§ 34. Основные понятия о механической колебании	328
§ 35. Пружинный маятник	333
§ 36. Математический маятник	337



§ 37. Сложения механических колебаний	346
§ 38. Основные понятия о механических волнах	353
§ 39. Явления отражения, преломления, интерференции и дифракции для механических волн	363
§ 40. Элементы акустики. Звуковые явления	376
§ 41. Эффект Доплера в звуковых волнах	389
Лабораторные работы по главе V	402
Тесты по главе V	404
Задания к главе V	406
ГЛАВА VI. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ	413
§ 42. Колебательный контур. Электрические колебания. Формула Томсона	413
§ 43. Активное сопротивление и средняя мощность в цепи переменного тока	420
§ 44. Конденсатор и катушка индуктивности в цепи переменного тока	425
§ 45. Закон Ома для цепи переменного тока	431
§ 46. Трансформатор и передача в нем электрической энергии на большие расстояния	443
§ 47. Теория электромагнитного поля. Опыт Г. Герца. Свойства электромагнитных волн	450
§ 48. Понятие о радиосвязи, телевидении и радиолокации. Шкала радиоволн	457
Лабораторные работы по главе VI	462
Тесты по главе VI	467
Задания к главе VI	471
Ответы на тесты и задания	474
ПРИЛОЖЕНИЯ	477
Список использованной литературы	487

Дусмуратов Мансур Байсаятович,  
Ахмедов Шохдор Баратович,  
Тураева Лола Юлдашевна

## ФИЗИКА

(Основы Электродинамики)  
(II Часть)

Редактор: Х. Тахиров  
Художественный редактор: Т. Рахматуллаев  
Компьютерная верстка: А. Мухаммадиев

Лицензия издательства № 2244. 25.08.2020.  
Разрешение на печать 03.02.2023.  
Формат 60x84 1/16. Печать офсетная.  
«Times New Roman» гарнитура. Уч. изд. л. 30.  
Тираж 100. Заказ № 13.

Отпечатано в типографии «YANGI SHIRSHIQ BOOK».  
Адрес: о. Ташкент, г. Чирчиқ, ул. А. Темур.

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY TAILIM,  
FAN VA INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI  
SHIRSHIQ DAVLAT PEDAGOGIKA UNIVERSITETI  
**AHVOROT RESURS MARKAZI**