**Электрическое поле - взаимодействие зарядов**

**По материалам книги "Детская энциклопедия"**

Все окружающие нас предметы, растения, животные, несмотря на крайнее разнообразие, построены примерно лишь из 90 видов мельчайших частиц - атомов. Это замечательное единство природы простирается еще дальше. Все атомы, в свою очередь, построены из еще более мелких частиц, называемых элементарными. Число их видов еще меньше. В состав атома, в основном, входят электроны, протоны и нейтроны. Элементарные частицы оказывают друг на друга определенные воздействия. Существование определенных сил между элементарными частицами приводит к тому, что они объединяются в более или менее сложные системы - атомы различных видов. И, наконец, эти же силы взаимодействия вызывают сцепление, атомов друг с другом в веществах. Несмотря на удивительное разнообразие воздействий тел друг на друга в безграничных просторах Вселенной, на нашей планете в любом куске вещества, в живых организмах, в том числе и в организме человека, в атомах и, наконец, в атомных ядрах мы всегда встречаемся с проявлением сил тяготения, электрических, магнитных и ядерных. Учение об электричестве и магнетизме охватывает всю громадную совокупность явлений природы, для течения которых основную роль играют электромагнитные силы. Трудно, почти невозможно указать явление, не связанное с действием электромагнитных сил. Поэтому, изучение их имеет важнейшее значение. Силы всемирного тяготения играют решающую роль только в том случае, когда во взаимодействии участвуют тела космических масштабов. Эти силы управляют движением звезд, поддерживают стройный порядок в нашей солнечной системе. Они же вызывают притяжение всех тел на Земле к ее центру. При взаимодействии элементарных частиц, атомов, молекул, небольших масс вещества силы тяготения совершенно ничтожны, ими вполне можно пренебречь. Ядерные силы обеспечивают устойчивость атомного ядра. Посредством этих сил протоны и нейтроны объединяются в атомные ядра. С расстоянием ядерные силы очень быстро убывают. Вне атомного ядра они практически не сказываются. Электромагнитным силам в природе принадлежит необычайно широкая «арена деятельности». Ими определяется строение атома: электроны, обращающиеся вокруг атомного ядра, удерживаются около него благодаря действию электрических сил. Электромагнитные силы действуют и между отдельными атомами и молекулами. Силы, вызывающие объединение атомов в молекулы,- химические силы - также имеют электромагнитную природу. Таково же происхождение сил сцепления между атомами и молекулами, приводящих к образованию различных веществ. Правда, в этих случаях силы взаимодействия тоже довольно быстро убывают с расстоянием. На расстояниях, превышающих размеры атома в десять раз, они уже почти не сказываются. В атомном ядре между протонами (положительно заряженными частицами) действуют мощные силы электрического отталкивания. Именно они сообщают частицам большие скорости при разрушении ядер в реакторах атомной электростанции и при взрыве атомной бомбы. Наконец, к электромагнитным явлениям относятся свет, тепловое излучение и радиоволны. В повседневной жизни и в технике мы на каждом шагу встречаемся с различными проявлениями электромагнитных сил. Действительно, с какими силами мы имеем дело? В первую очередь это силы упругости. Благодаря силам упругости твердые тела сохраняют свою форму, а жидкие - свой объем. Эти же силы препятствуют уменьшению объема газа. Далее, силы трения и вязкости, которые тормозят движение тел, жидкостей и газов. Наконец, сила наших мышц. Все эти силы, несмотря на все свое различие, имеют общую электромагнитную природу. Общеизвестно и широчайшее применение электромагнитных явлений в технике: электрическое освещение, связь, электродвигатели, сложнейшие радиотехнические устройства, быстродействующие вычислительные машины и т. д. Наш век - это век электричества. Почему электромагнитные силы так широко распространены? Почему они столь разнообразны? Прежде всего дело в том, что все атомы в основном построены из электрически заряженных частиц: электронов и протонов. С другой стороны, эти силы гораздо значительнее сил тяготения и действуют на гораздо больших расстояниях, чем ядерные. Например, в атоме водорода электрическая сила взаимодействия между электроном и ядром в 1042 раз больше силы тяготения между ними. Разнообразие проявлений электромагнитных сил определяется фактом существования электрических зарядов двух типов: положительных и отрицательных. Отрицательный заряд несут на себе в основном легкие элементарные частицы - электроны, а положительный - в 1836 раз более тяжелые протоны. Величина электромагнитных сил зависит не только от расстояния между зарядами, как у сил тяготения, но и от состояния их движения, в частности от скорости. В этом заключается еще одна важная причина разнообразия в проявлении этих сил. Все электромагнитные явления можно объяснить действием сравнительно немногих общих законов. Теперь наш рассказ пойдет о самом главном. Что представляют собой основные законы электромагнитных явлений? Как удалось их открыть? Как с их помощью ученые объясняют различные явления природы? Как используют их для практических целей? Сотни томов посвящены исследованию электромагнитных явлений, и еще сотни будут написаны. Поэтому не удивительно, что многое в нашем кратком рассказе останется незатронутым.

**Рождение науки**

Мы не знаем, когда люди впервые обнаружили, что тела могут быть приведены в особое состояние - наэлектризованы. Произошло это очень давно. Впервые в VI в. до н. э. описал этот факт греческий философ Фалес Милетский. По словам ученого, ткачихи заметили способность янтаря, потертого о шерсть, притягивать к себе легкие предметы, не соприкасаясь с ними. Оказывается, подобным свойством обладает не только янтарь. Если провести несколько раз гребенкой по сухим волосам, то она начнет притягивать мелкие кусочки бумаги. Тела, приведенные в такое состояние, называют наэлектризованными. В этих простейших опытах люди впервые столкнулись с явным проявлением электрических сил. Но прошло более двух тысячелетий, прежде чем началось систематическое исследование электричества и был открыт закон взаимодействия наэлектризованных тел. Странное поведение янтаря и некоторых других предметов казалось любопытным курьезом. Ничто не говорило о том, что здесь в простейшей форме выступают законы, управляющие течением большинства явлений на Земле. Сейчас мы хорошо знаем, что происходит при электризации тела. Наиболее подвижные заряженные частицы - электроны - при трении переходят с одного тела на другое. Тело, получающее избыток электронов, заряжается отрицательно, а потерявшее электроны - положительно. Закон взаимодействия заряженных тел, покоящихся относительно друг друга, был установлен Кулоном в конце XVIII в. Очевидно, что нельзя дать общий закон взаимодействия для заряженных тел произвольных размеров и формы, так как сила взаимодействия зависит от формы и взаимного расположения тел. Размеры же тел и их взаимное расположение могут быть бесконечно разнообразными. Однако опыт показывает, что если размеры заряженных тел много меньше расстояния между ними, то сила взаимодействия не будет зависеть от формы и размера заряженных тел. Именно для этого случая и был установлен закон, имеющий общее значение. Для исследования взаимодействия зарядов Кулоном был сконструирован специальный прибор - крутильные весы.

С помощью этого прибора можно исследовать взаимодействие маленьких заряженных шариков А и. В. Шарик В закреплен неподвижно, а шарик А с помощью коромысла К подвешен на длинной упругой нити Н. Закручивая эту нить вращением головки прибора, можно уменьшать расстояние между шариками, а по углу закручивания нити судить о величине силы взаимодействия шариков. В результате этих опытов Кулон нашел, что сила электрического взаимодействия убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, т.е. уменьшается, скажем, в четыре раза при увеличении расстояния вдвое. Кроме того, эта сила зависит от величины зарядов шариков. Это можно установить так. Коснемся шарика В (или А) другим, незаряженным шариком тех же размеров. Тогда заряды распределятся поровну и, следовательно, заряд шарика В уменьшится вдвое. Опыт показывает, что и сила взаимодействия уменьшается вдвое. Повторяя подобный прием, можно убедиться, что сила пропорциональна произведению зарядов.

**Электрическое поле**

Как же осуществляется взаимодействие двух зарядов? Первоначально полагали, что заряды непосредственно через пустоту действуют друг на друга. Каждый заряд на расстоянии «чувствует» присутствие другого. Это была так называемая «теория дальнодействия». Если переместить заряд В, то сила, действующая на заряд А, изменится, хотя никаких изменений с зарядом А и окружающим его пространством не произошло. Такое представление явно неудовлетворительно. Изменение силы с точки зрения «теории дальнодействия», можно воспринять только как «чудо». Правда, «чудо», подчиняющееся определенному количественному закону. Величайшей заслугой английского физика Майкла Фарадея - основоположника современных представлений об электромагнетизме-было то, что он ввел совершенно новое понятие - понятие электрического поля. Согласно его идее, заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждый из них создает в окружающем пространстве электрическое поле. Величина электрического поля убывает по мере удаления от заряда. На заряд А действует не сам заряд В, а созданное им поле.

Теперь не удивительно, что перемещение заряда В в новое положение меняет силу, действующую на заряда. Ведь при этом меняется поле заряда В в той точке, где расположен заряд А. Действие заряда передается в пространстве от точки к точке посредством электрического поля. В этом заключается «теория близкодействия». С ее появлением «теория дальнодействия» была оставлена.

Что же такое электрическое поле? Его существование в пространстве столь же достоверно, сколь и существование самих зарядов. Электрическое поле представляет собой особое, специфическое состояние материи. Мы не можем разъяснить, что такое поле, не рассказав, из чего оно состоит: ничего более простого, чем электрическое поле, мы не знаем, подобно тому как мы не знаем ничего более простого, чем элементарные частицы. Наше представление о том, что такое электрическое поле, образуется в результате опытного исследования свойств поля. Основное его свойство заключается в способности действовать на электрический заряд с определенной силой. По величине этой силы можно судить о величине поля. Помещая один и тот же электрический заряд в различные участки электрического поля, мы замечаем, что сила, действующая на него, будет меняться. Следовательно, величина поля в различных точках пространства будет различной. Принято характеризовать величину поля силой действующей на положительный заряд, равный единице. Эта характеристика поля называется напряженностью электрического поля. Распределение электрического поля в пространстве можно считать известным, если мы знаем напряженность поля в каждой точке. В учении об электричестве понятие поля играет основную роль. После введения представления о поле центр тяжести в исследовании электромагнитных процессов сосредоточивается уже не на изучении самих зарядов, а на изучении свойств пространства между ними, заполненного электрическим полем. В каждой точке пространства поле действует на положительный заряд с некоторой силой, имеющей определенное направление. Это направление принимается за направление поля. Силовой линией называется линия, касательная к которой в каждой точке указывает направление поля.

Электрическое поле непосредственно не действует на наши органы чувств. С этим, кстати, связаны некоторые затруднения при введении представлений о поле: ведь нелегко убедиться в реальности того, что мы непосредственно не ощущаем. Однако с помощью не очень сложного опыта мы можем сделать силовые линии «видимыми». Дело в том, что твердые продолговатые частицы гипса или другого не проводящего электричество вещества поворачиваются вдоль поля, располагаясь как раз по силовым линиям. Для полного успеха опыта нужно располагать электрической машиной, способной сообщить телам достаточно большой заряд. Чтобы силы трения не мешали частицам поворачиваться вдоль поля, их нужно поместить в жидкий изолятор, например в касторовое масло… Тела между которыми изучается иоле, расположены в ванночке с прозрачным дном. Возникающая в ванночке картина распределения силовых линий проектируется на экран с помощью объектива, двух зеркал и конденсатора.

Интересно, что электрически нейтральная в целом система из двух зарядов противоположных знаков создает в окружающем пространстве электрическое поле. Правда, в этом случае поле в основном сосредоточено между зарядами. Вне пространства между зарядами электрические силы сказываются слабо. Если при этом геометрические размеры зарядов значительно меньше расстояния между ними, то такая система называется электрическим диполем. Постоянное электрическое поле обладает одним важным свойством, позволяющим ввести еще одну величину, которая характеризует поле наряду с напряженностью. Работа, которую совершают силы электрического поля при перемещении заряда из одной точки пространства в другую, не зависит от формы выбранного пути.

Такие поля называются потенциальными. Потенциальным является поле тяготения Земли. Работа, которую надо совершить, чтобы поднять тело над Землей, не зависит от формы пути подъема, а определяется только начальным и конечным положением тела над Землей - высотой подъема. Следовательно, в электрическом поле работа при перемещении данного заряда целиком определяется характером поля и положением в пространстве начальной и конечной точек пути. В свою очередь электрическое поле вполне определено, если известна работа по перемещению единичного положительного заряда между двумя любыми точками в пространстве, занятом полем. Эта работа называется разностью потенциалов или напряжением (не путать с напряженностью!). Итак, электрическое поле можно характеризовать двумя величинами: либо заданием напряженности в каждой точке пространства, либо работой по перемещению единичного заряда между двумя любыми точками-разностью потенциалов. Напряженность - функция одной точки пространства; новая величина - разность потенциалов - функция двух точек. Обе величины однозначно связаны друг с другом так же, как работа и сила в механике. Возникает естественный вопрос: зачем вводить две характеристики поля, а не довольствоваться одной напряженностью? Тем более, что характеристика поля с помощью задания силы в каждой точке гораздо яснее и нагляднее. Все дело в том, что многие электрические явления, а главным образом величина электрического тока в цепи, зависят не от напряженности поля в какой-либо одной точке, а именно от разности потенциалов между двумя точками, например на концах проводника в случае тока. При падении тела с некоторой высоты для оценки результатов падения важно знать не силу, действующую на тело в какой-либо точке, а работу, совершенную силой тяжести на пути падения. Точно так же для определения эффекта, который может вызвать электрическое поле, чаще всего нужно знать работу, которую оно может совершить при перемещении заряда, а не силу, действующую на него в некоторой точке поля. Правда, зная величину поля в каждой точке пространства, мы всегда можем вычислить работу по перемещению заряда, но знание разности потенциалов означает, что эта работа известна. Вот почему понятие разности потенциалов (или напряжения) прочно вошло не только в науку и технику, но и в обиходную жизнь. Каждый из вас знает, что напряжение в сети городского тока является главной ее характеристикой. Это напряжение определяет текущий по электрической лампочке или по обмотке трансформатора телевизора ток и, следовательно, то количество энергии, которое поступает из сети.

**Вещества в электрическом поле**

В электрическом отношении все тела делятся на проводники и изоляторы (диэлектрики). Те и другие в обычном состоянии электрически нейтральны. Заряд, сообщенный изолятору, не перемещается по нему, оставаясь в том месте, куда он первоначально помещен. В проводнике же заряды могут свободно перемещаться под влиянием электрического поля. (В последнее время большое значение приобрели так называемые полупроводники, но здесь мы о них говорить не будем: им посвящена специальная статья.). Такое различие в поведении вызвано особенностями строения проводников и диэлектриков. Диэлектрики состоят из отдельных нейтральных атомов или молекул. Проводники (к ним относятся все металлы) построены иначе. Атомы металла, образуя кристаллическую решетку, теряют «внешние», более удаленные от ядра и, следовательно, слабо с ним связанные электроны. Эти электроны перестают принадлежать определенным атомам и становятся «собственностью» всего куска металла в целом. Такие электроны называют «свободными», так как они могут перемещаться внутри металла. Атомы, лишенные части электронов и составляющие остов кристаллической решетки, называются ионами. Рассмотрим, например, металл литий. Атом лития имеет положительно заряженное ядро, вокруг которого совершают сложные движения три электрона. Когда литий находится в твердом состоянии, то два электрона каждого атома продолжают обращаться вокруг ядра, а третий электрон может, оторвавшись от атома, перемещаться внутри металла. Наличие свободных электронов и определяет все особенности металлов: способность хорошо проводить электрический ток, большую теплопроводность и т. д. Простой опыт позволяет выяснить, как при отсутствии электрического тока распределяется по проводнику сообщенный ему заряд. Для этого достаточно прикрепить к заряженной проволочной сетке, свернутой в виде цилиндра, тонкие полоски станиоля. Листочки, расположенные на внутренней поверхности сетки, останутся неподвижными, а прикрепленные к внешней поверхности - оттолкнутся от нее.

Следовательно, электрический заряд имеется лишь на внешней поверхности сетки и заряжает только внешние листочки. Это и вызывает их отклонение на некоторый угол. На внутренней поверхности сетки, очевидно, зарядов нет. Этот факт является совершенно общим. Электрический заряд располагается на внешней поверхности проводника. Получить заряд на внутренней поверхности проводника при отсутствии токов в нем нельзя. Причину этого понять нетрудно. Одноименные заряды, отталкиваясь и стремясь как можно дальше уйти друг от друга, располагаются на внешней поверхности проводника. Это правило справедливо независимо от того, какая причина вызывает появление заряда. Если поместить металлическое тело в постоянное (не меняющееся с течением времени) электрическое поле, на его поверхности возникают так называемые индукционные заряды, но внутри проводника заряд по-прежнему остается равным нулю. При этом и само электрическое поле не проникает внутрь проводника. Только в первый момент, при внесении проводника в поле, оно проникает внутрь металла и вызывает перемещение электронов навстречу полю. Левая часть тела заряжается при этом отрицательно, а правая - положительно.

Заряды будут перемещаться до тех пор, пока не установится равновесие. Тогда ток прекратится. Происходит это крайне быстро. Если движения зарядов в проводнике нет, то, значит, в нем нет и электрического поля, иначе свободные электроны пришли бы в движение. Одновременно можно заметить, что силовые линии электрического поля, обрываясь на поверхности металла, всегда перпендикулярны к ней. Поле вдоль поверхности равно нулю, так как токи на поверхности также отсутствуют. Непроницаемость металлов для постоянного электрического поля широко используется для устройства так называемой электростатической защиты. Чтобы оградить чувствительные электрические приборы от влияния внешних случайных электрических полей, их помещают в металлические ящики. Если проводник имеет форму шара, то заряды на нем располагаются равномерно по всей поверхности. Если же он имеет острые выступающие части, то заряды скопляются преимущественно на остриях. Возникающая при этом большая напряженность поля способна вызвать ряд любопытных явлений. Проводник начинает разряжаться. Заряды «стекают» с острия, вызывая заметное перемещение воздуха - «электрический ветер». Этот ветер может погасить пламя свечи на расстоянии нескольких сантиметров от острия.

Явление «стенания» электричества используется в молниеотводах - заземленных металлических стержнях, высоко поднятых над окружающими зданиями. Только при очень сильных грозах молния ударяет в молниеотвод, но при этом электрический заряд не приносит вреда - уходит в землю. Посмотрим теперь, как влияет на взаимодействие заряженных тел диэлектрик. Для этого сначала с помощью крутильных весов измерим силу взаимодействия между разноименно заряженными шариками А и В, Затем заполним стеклянный сосуд весов каким-либо жидким диэлектриком, например керосином. Никаких заметных на глаз изменений с диэлектриком не произойдет. Однако существующее между шариками электрическое поле совершает в нем работу. О ней можно судить по результатам. Расстояние между шариками увеличится, что говорит об уменьшении силы притяжения. Измерение покажет, что в керосине сила взаимодействия шариков в два раза меньше, чем в воздухе. Почему это происходит? Поле проникает внутрь электрически нейтральных молекул керосина. Положительные заряды молекул смещаются вдоль поля, а отрицательные - против поля. Так как эти заряды связаны друг с другом значительными силами, то молекулы не разрываются, они лишь растягиваются вдоль силовых линий, превращаясь в системы, которые можно рассматривать как электрические диполи.

Посмотрите, как непрерывные цепочки диполей вытягиваются между зарядами! Диэлектрик, находящийся в таком состоянии, называется поляризованным. Особенно существенно, что отрицательно заряженные концы диполей сплошным покровом охватывают положительный заряд, а положительные концы диполей - отрицательный. Положительные и отрицательные концы диполей в керосине соприкасаются друг с другом, и их электрическое действие нейтрализуется. Но на поверхности шариков такой компенсации не происходит. Легко представить, к чему это приводит. Теперь поле создают не только сами шарики, но и «связанные» заряды концов диполей. Поле в диэлектрике, созданное одним из шариков, например А, ослабевает, так как заряд шарика А и «связанный» заряд на его поверхности имеют разные знаки и создают поля противоположного направления. Ясно, что уменьшается и сила, действующая на другой шарик (В). Число, показывающее, во сколько раз уменьшается в данном диэлектрике поле, созданное зарядом, называется диэлектрической проницаемостью данного вещества. Диэлектрическая проницаемость характеризует электрические свойства диэлектрика. Различные диэлектрики имеют разные значения диэлектрической проницаемости. Так, диэлектрическая проницаемость воздуха близка к единице (1,00059), а воды - примерно в 80 раз больше. У некоторых диэлектриков, как например сегнетовая соль, диэлектрическая проницаемость очень велика, около 10 000. Подобные вещества называют сегнетоэлектриками. Они находят важное применение при изготовлении высокоэффективных электрических конденсаторов. Отметим еще, что у ряда диэлектриков, например у воды, молекулы и в отсутствие электрического поля представляют собой диполи. Поляризация таких диэлектриков состоит в простом повороте всех диполей вдоль электрического поля.

При помещении в электрическое поле поляризация диэлектрика обычно не сопровождается изменением его размеров. Однако у некоторых кристаллических веществ дело обстоит иначе. У сегнетовой соли, кварца и др. поляризация сопровождается механическими деформациями: сжатием или растяжением. И наоборот, если подвергать эти тела деформациям, то они поляризуются и на их поверхности выступают «связанные» электрические заряды. Это явление называется пьезоэлектрическим эффектом. Пьезоэлектрический эффект находит широкое практическое применение. Деформация кварца в переменном электрическом поле используется для получения ультразвука. Поляризация диэлектрика под действием деформации используется для преобразования механических воздействий в электрические. На этом принципе устроен пьезоэлектрический звукосниматель электрического проигрывателя. Колебания иглы при движении по звуковой дорожке деформируют маленький кристалл и вызывают, его поляризацию. Связанные заряды, выступающие на поверхности кристалла, создают переменные электрические поля, возбуждающие слабые электрические токи в подходящих к кристаллу проводниках звукоснимателя. Эти токи усиливаются и подаются в репродуктор. На этом же принципе основаны точные методы измерения давлений.

**Электрический ток в металлах**

Электрическим током называется движение любых электрических зарядов. Перемещение зарядов в каком-либо веществе всегда встречает сопротивление и требует совершения работы. Поэтому для получения электрического тока в замкнутой цепи необходим прежде всего источник, за счет энергии которого совершалась бы работа по перемещению зарядов. Таким источником, например, может служить гальванический элемент, аккумулятор, генератор электрического тока. Судить о прохождении электрических зарядов можно лишь по тем явлениям, которые сопровождают электрический ток. Так, при пропускании электрического тока по проволоке она накаляется. При прохождении тока через растворы на электродах происходит выделение вещества. Наконец, что чрезвычайно существенно, при прохождении электрического тока по проводнику вокруг него всегда возникает магнитное поле, которое можно обнаружить по отклонению магнитной стрелки, расположенной около проводника. Приступая к изучению электрического тока в металлах, зададимся прежде всего вопросом, по какому физическому признаку можно отличить металл от неметалла. Таким признаком может служить зависимость электрического сопротивления вещества от температуры. Поставим опыт. Включим в электрическую цепь проволочное сопротивление и будем измерять ток в цепи. Заметим, что при нагревании проволоки величина тока в цепи уменьшается, а при охлаждении - увеличивается. На основании этого опыта можно сделать вывод, что сопротивление металлической проволоки растет с увеличением температуры.

Что же происходит в металле при прохождении по нему электрического тока и почему электрическое сопротивление металла растет с повышением температуры? Тепловое движение в металлах существенно отличается от теплового движения в газе. Ионы, образующие остов кристаллической решетки, не могут перемещаться по металлу подобно свободным электронам. Они совершают лишь колебания около некоторых средних положений, называемых узлами кристаллической решетки. Это движение можно уподобить движению шарика на пружинках.

При нагревании металла размах колебаний ионов около узлов кристаллической решетки возрастает. Чем выше температура, тем больше амплитуда колебаний, а следовательно, и энергия колебательного движения ионов. При подключении металлического проводника к источнику тока, внутри проводника возникает электрическое поле. При этом на заряженные частицы будет действовать сила, равная произведению электрического заряда на напряженность электрического поля. Под действием этой силы свободные электроны будут перемещаться по металлу. Их движение и создает электрический ток. Какова же роль ионов при прохождении электрического тока через металл? Электроны под действием электрического поля движутся с ускорением. Это значит, что скорость свободных электронов, а следовательно, и их кинетическая энергия возрастают. При своем движении электроны сталкиваются с ионами кристаллической решетки, передавая им при этом часть своей кинетической энергии. В результате вдоль металла устанавливается движение свободных электронов с некоторой постоянной средней скоростью - по металлическому проводнику идет постоянный ток. Таким образом, приобретаемая в промежутках между столкновениями в результате ускоренного движения под действием поля кинетическая энергия передается от свободных электронов ионам кристаллической решетки. Ионы препятствуют движению свободных электронов. Этим обусловлено электрическое сопротивление металлов. Оно растет при повышении температуры вследствие увеличения частоты столкновений электронов с ионами решетки. Напряженность электрического поля в металле растет с увеличением разности потенциалов. Связь между величиной тока, разностью потенциалов и электрическим сопротивлением устанавливается на опыте и определяется законом Ома. Согласно ему ток на участке проводника прямо пропорционален разности потенциалов на концах участка и обратно пропорционален его электрическому сопротивлению. Нарисованная выше картина движения электронов в металле при прохождении через него электрического тока позволяет понять смысл закона Ома. Действительно, чем больше на концах данного металлического образца (например, куска проволоки) разность потенциалов, тем больше напряженность электрического поля, тем больше будет сила, действующая на свободные электроны, тем больше скорость их движения. Поэтому с ростом разности потенциалов ток возрастает. Пусть теперь разность потенциалов постоянна, и мы включаем в цепь одинаковые по размерам куски проволоки, сделанные из разных металлов. Теперь ток будет больше в том металлическом образце, в котором взаимодействие электронов с ионами слабее и ионы меньше препятствуют движению электронов. С уменьшением сопротивления ток увеличивается. Куда же переходит энергия, которая передается электронами ионам при их взаимодействии? Как мы уже говорили, ионы не могут свободно перемещаться вдоль металла. Передаваемая им энергия идет на увеличение размаха колебаний, на возрастание энергии теплового движения. И в самом деле, прохождение электрического тока сопровождается нагреванием металла. Связь между количеством выделившейся теплоты, величиной тока и сопротивлением выражается законом Джоуля - Ленца. Однако не всегда прохождение тока через металлы происходит так, как это описано выше. Еще в 1911 г. голландский физик Камерлинг - Оннес открыл замечательное явление, которое называют сверхпроводимостью. Он изучал прохождение электрического тока через ртуть при низких температурах. Оказалось, что электрическое сопротивление ртути при температуре 4,12° по абсолютной шкале температур падает до нуля.

В настоящее время известны 23 чистых металла, обладающих свойством сверхпроводимости. Им обладают также очень многие соединения и сплавы. В таблице приведена температура перехода в сверхпроводящее состояние для некоторых проводников.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вещество | Температура перехода | Вещество | Температура перехода |
| Ртуть | 4,12 | Тантал | 4,38 |
| Свинец | 7,26 | Ниобий | 9,22 |
| Алюминий | 1,14 | Карбид ниобия | 10,1 |
| Цинк | 0,79 | Нитрид ниобия | 23,0 |

Сверхпроводники обладают также замечательными магнитными свойствами. В 1933 г. немецкий ученый Мейснер обнаружил, что при переходе в сверхпроводящее состояние магнитное поле полностью выталкивается из объема сверхпроводника и концентрируется в узком поверхностном слое (порядка 10-5см).

Таким образом, магнитное поле не проникает внутрь вещества, находящегося в сверхпроводящем состоянии. Магнитные силовые линии как бы обтекают сверхпроводник, не проникая в него. Более сорока лет не удавалось дать объяснение этим замечательным явлениям. В изучении явления сверхпроводимости большую роль сыграли работы Лондона, Пиппарда, Л. Д. Ландау, А. И. Шальникова и многих других ученых. Лишь в 1957 г. была создана теория сверхпроводимости. Согласно этой теории, состояние теплового движения в металле, находящемся в сверхпроводящем состоянии, существенно отличается от состояния теплового движения в обычном (несверхпроводящем) состоянии металла. Механизм электропроводности сверхпроводников иной, чем описанный выше механизм проводимости обычных металлов. Электроны в этом случае образуют с колеблющимися ионами связанную систему. Основа современной теории сверхпроводимости заложена в работах английского физика Г. Фрелиха, американских физиков Бардина, Купера, Шриффера. Зависимость сопротивления металла от температуры используется в так называемых термометрах сопротивления. Температура в этом случае определяется по величине сопротивления металлической проволоки. Достоинство термометров сопротивления состоит, в частности, в том, что они могут использоваться как при высоких, так и при очень низких температурах. Особые свойства сверхпроводников открывают широкие возможности для различных их применений.

**Прохождение электрического тока через газы**

При обычных условиях газы, в том числе и воздух, не являются проводниками. В этом легко убедиться, наблюдая за положением стрелки заряженного электрометра. Если воздух в помещении, где находится электрометр, сухой, то заряд электрометра долгое время остается неизменным. Однако воздух можно сделать проводником. Для этого его надо подвергнуть одному из следующих воздействий: нагреть, например, поднеся свечу или горелку к электрометру, облучить ультрафиолетовыми или рентгеновскими лучами, подвергнуть действию радиоактивного излучения и т. п. При всех этих воздействиях, если, конечно, они достаточно интенсивны, электрометр быстро разряжается. Это значит, что газ при этих воздействиях становится проводником электричества. Почему же меняются электрические свойства газа при наличии указанных выше воздействий? При обычных условиях газы состоят из нейтральных атомов или молекул. Под действием высокой температуры и различных излучений из части нейтральных атомов вырываются электроны. В результате образуются положительно заряженные ионы и свободные электроны. Могут образовываться также и отрицательные ионы. Появление в газе заряженных частиц и делает его проводником электричества. Процесс образования ионов и электронов в газах называется ионизацией. Все перечисленные выше факторы, вызывающие появление ионов, называются ионизаторами. Если ионизатор перестает действовать, то заряженный электрометр будет опять сохранять заряд, т. е. газ перестает быть проводником. Происходит это вследствие того, что ионы и электроны, находясь в непрерывном тепловом движении и сталкиваясь друг с другом, вновь образуют нейтральные атомы и молекулы. Этот процесс называется рекомбинацией (воссоединением) ионов. Возьмем наполненную разреженным газом стеклянную трубку с двумя металлическими электродами. Включим ее в электрическую цепь. Поднесем какой-либо ионизатор, за счет которого в газе образуется определенное число пар ионов противоположных знаков (положительно заряженный ион и электрон, положительно заряженный ион и отрицательно заряженный ион). Если разность потенциалов на электродах трубки равна нулю, то установится динамическое равновесие, при котором число вновь образующихся пар ионов будет равно числу пар ионов, исчезающих вследствие рекомбинации.

Если к электродам приложить небольшую разность потенциалов, то положительно заряженные ионы начнут перемещаться к отрицательному электроду, а отрицательно заряжение - к положительному. Вследствие этого в трубке, наполненной газом, возникнет электрический ток. Прохождение электрического тока через газ называется газовым разрядом. При этом лишь часть пар ионов, образующихся за счет ионизатора, будет рекомбинировать в объеме газа, а остальные будут нейтрализоваться на электродах. Увеличивая разность потенциалов, достигнем того, что практически все ионы нейтрализуются у электродов. При таком значении разности потенциалов ток, казалось бы, должен достигнуть максимального значения и при дальнейшем увеличении разности потенциалов оставаться неизменным.

Однако опыт показывает, что при дальнейшем увеличении разности потенциалов, начиная с некоторого значения, называемого потенциалом зажигания, ток снова возрастает.

Это значит, что в газе появляются дополнительные ионы сверх тех, которые образуются за счет ионизатора. Количество новых ионов должно быть очень большим, так как ток может возрастать в сотни и тысячи раз. Разряд при этом начинает светиться. Если теперь выключить ионизатор, то разряд не прекратятся. Это значит, что ионы теперь могут образовываться в газе без внешнего ионизатора в результате процессов, происходящих в самом разряде. Газовый разряд, который уже не нуждается во внешнем ионизаторе для своего поддержания, называется самостоятельным разрядом. Напряжение, при котором возникает самостоятельный разряд, называется напряжением зажигания. Как объяснить резкое увеличение тока в разряде при потенциалах, больших потенциала зажигания? Рассмотрим какую-либо пару ионов (положительный ион и электрон), которая образовалась за счет внешнего ионизатора. Появившийся таким образом свободный электрон начинает двигаться к положительному электроду. На своем пути он встречает ионы и нейтральные атомы. В промежутках между двумя последовательными столкновениями его энергия увеличивается за счет приложенной разности потенциалов. При столкновении с ионом или атомом электрон передает им часть своей энергии. Если разность потенциалов достаточно велика, то кинетическая энергия электрона становится настолько большой, что при столкновении с нейтральным атомом он может произвести его ионизацию. Полученные таким путем два электрона в свою очередь будут ускоряться и ионизировать встречные атомы. Таким образом, при потенциалах, больших потенциала зажигания, число ионов в газе начинает быстро нарастать и уже не за счет внешнего ионизатора, а вследствие процессов, происходящих в самом разряде. Возможны другие способы образования ионов в газе, которые также приводят к развитию самостоятельного разряда. В зависимости от характера самостоятельного разряда и способа образования в нем ионов различают тлеющий, дуговой, искровой, коронный и другие разряды. Тлеющий разряд обычно наблюдается при давлениях в несколько десятков миллиметров ртутного столба и более низких. Но в специальных условиях удается получить тлеющий разряд и при более высоких давлениях. В тлеющем разряде положительные ионы, которые образуются электронными ударами в газе, при своем движении к катоду приобретают большую энергию. При ударах таких быстрых ионов о катод происходит выбивание электронов из металла (вторичная электронная эмиссия). Эти два процесса (ионизация электронным ударом и вторичная электронная эмиссия на катоде) и являются основными в тлеющем разряде.

Рассмотрим некоторые применения тлеющего разряда. Тлеющий разряд используется в ряде приборов: выпрямителях тлеющего разряда, преобразующих переменный ток в постоянный, в тлеющих стабилизаторах напряжения - стабиловольтах, поддерживающих постоянное электрическое напряжение. Тлеющий разряд возникает при зажигании сигнальных неоновых лампочек, в лампах дневного света и в рекламных трубках. Так, в лампах дневного света тлеющий разряд обычно происходит в парах ртути. Излучение паров ртути, которое, в основном, приходится на фиолетовую и ультрафиолетовую области спектра, поглощается слоем специального вещества (люминофора), нанесенного на поверхность трубки. Эти вещества подбирают так, чтобы они, поглощая фиолетовые и ультрафиолетовые лучи, излучали свет, состав которого был бы близок к солнечному. В трубках, применяемых для реклам, обычно используется тлеющий разряд в неоне (красное свечение) и в аргоне (синевато-зеленое свечение). Большое практическое значение имеет другая форма самостоятельного разряда - дуговой разряд, который впервые был осуществлен русским академиком В. В. Петровым в 1802 г. Дуговой разряд можно получить, увеличивая в тлеющем разряде величину тока и уменьшая внешнее сопротивление.

Наиболее просто дуговой разряд получается путем раздвижения угольных электродов. При этом из-за увеличения сопротивления между электродами резко увеличивается температура, воздух ионизируется и начинается разряд. Температура кратера дуги (углубления, образующегося на положительном электроде) при атмосферном давлении достигает 4000°С, а при давлении 20 атм. превышает 7000°С. Чтобы представить себе, сколь велика эта температура, можно сравнить ее с температурой поверхности Солнца - фотосферы,- равной примерно 6000°С. Высокая электропроводность газа в дуговом разряде обеспечивается большим числом электронов, вылетающих из катода. Вылет большого числа электронов из катода обусловлен его высокой температурой. При этом происходит процесс термоэлектронной эмиссии. Электрическая дуга является мощным источником света и используется в прожекторах, проекционных и киноаппаратах. В настоящее время в качестве источников света используются дуговые лампы, в которых дуговой разряд происходит при высоком давлении. Дуговой разряд используется для сварки и резки металлов. В металлургии широко используются электропечи, в которых источников теплоты является электрическая дуга. Дуговой разряд низкого давления с ртутным катодом в парах ртути используется в ртутных выпрямителях переменного тока. Отличительная черта ртутных выпрямителей - малое внутреннее сопротивление. Ими пользуются для выпрямления переменных токов большой величины (сотни ампер). Ртутный дуговой разряд применяется в медицине в качестве источника ультрафиолетовых лучей. Большой интерес представляет искровой разряд. По внешнему виду искровой разряд представляет собой пучок ярких зигзагообразных разветвляющихся от тонкого канала полосок. Они быстро пронизывают разрядный промежуток, гаснут, затем возникают вновь. Для возникновения электрической искры необходимо, чтобы напряженность электрического поля в газе превышала некоторое критическое значение. Для воздуха при атмосферном давлении оно равняется примерно 30 000 в/см; с ростом давления его величина увеличивается. Примером гигантского искрового разряда I является молния. Молнии возникают или между облаками, или между облаком и землей. Величина тока в молнии достигает полумиллиона ампер, а напряжение между облаком и землей - миллиарда вольт. Отдельные разряды молнии очень кратковременны, всего лишь около одной миллионной доли секунды. При образовании искрового разряда наряду с образованием ионов при столкновениях существенную роль играет также ионизация за счет излучения самой искры, температура газа в канале которой может превышать 100 000°С. Степень ионизации в канале искры близка к 100%. Отметим еще очень красивое и своеобразное явление - шаровую молнию - яркое светящееся образование, которое сравнительно медленно перемещается в воздухе. Размеры шаровых молний могут быть различны. Чаще всего наблюдаются молнии диаметром 10-20 см, но иногда они достигают десятков метров в диаметре. Продолжительность существования шаровой молнии различна: от долей секунды до нескольких минут. Исчезает она внезапно, взрываясь и причиняя при этом иногда значительные разрушения. Попытки разгадать природу шаровой молнии и получить ее в лаборатории пока еще не увенчались полным успехом. Наблюдения показывают, что на земном шаре за сутки происходит более сорока тысяч гроз, а среднее число ударов молний в секунду около двух тысяч. Для защиты различных сооружений от разрушения при ударе молнии применяются молниеотводы.

На верхушках деревьев, корабельных мачт и других выступающих предметов иногда появляется свечение. В старину оно вызывало суеверный ужас у мореплавателей. Его называли «огнями святого Эльма». Это свечение представляет одну из разновидностей коронного разряда. Опытным путем коронный разряд получают на электродах из тонкой проволоки или с заостренными выступающими частями. Около выступающих частей напряженность поля может достигать очень больших значений. Если она превышает критическое значение (около 30 000 в/аи при атмосферном давлении), то воздух вблизи электрода ионизируется и происходит разряд. Светящаяся область разряда, сосредоточенная около выступающих частей, в некоторых случаях напоминает корону. Коронный разряд может возникнуть на выступающих частях или в проводах линий высокого напряжения, что приводит к значительным потерям электроэнергии. Уменьшают возможность возникновения коронного разряда, увеличивая диаметр проводов.

**Электрический ток в жидкостях**

Жидкости, как и твердые тела, могут быть и диэлектриками, и проводниками. К числу жидких диэлектриков относятся, например, дистиллированная вода, керосин, различные масла. Проводящие жидкости различаются по механизму переноса электрических зарядов. Так, например, в ртути и расплавленных металлах (медь, серебро и т. д.) перенос зарядов осуществляется, как и в твердых металлах, свободными электронами. Однако существует очень большое число жидкостей с совершенно иным механизмом электропроводности. К числу таких жидкостей относятся растворы солей, кислот, щелочей, расплавленные соли - это так называемые электролиты. В чем же их особенности и каким образом происходит в них перенос электрического заряда? Возьмем раствор поваренной соли NaCl в воде Часть молекул в нем распадается на положительно и отрицательно заряженные ионы Na+, Cl-. Такое разложение молекул в растворе на ионы называется электролитической диссоциацией. Степень диссоциации, т. е. доля молекул растворенного вещества, которые распадаются на ионы, зависит от температуры, концентрации раствора и природы растворителя. Ионы разных знаков, встречаясь, могут вновь воссоединяться в нейтральные молекулы. При заданных условиях в растворе устанавливается динамическое равновесие, при котором число молекул, распадающихся на ионы в единицу времени, равно числу пар ионов, которые в единицу времени вновь воссоединяются в нейтральные молекулы. Если включить сосуд с электролитом в электрическую цепь, то отрицательные ионы придут в движение по направлению к положительному электроду, а положительные - к отрицательному. Появится электрический ток. При этом произойдет электролиз - выделение на электродах веществ, входящих в состав электролита.

Электролиз широко применяется в технике. Для того чтобы покрыть, например, детали велосипеда тонким слоем никеля или хрома для предохранения от ржавления, их помещают в раствор солей этих металлов в качестве катода. Анод делают из металла, которым хотят покрыть деталь. Если пропускать ток через раствор, то металлический анод будет растворяться, а на катоде будет выделяться металл в виде тонкой пленки. Такой способ покрытия называется гальваностегией. Электролизом пользуются также для получения металлических отпечатков с рельефных предметов (медалей, монет, барельефов и т. д.). Для этого сначала получают на доске или стеарине отпечаток предмета. Затем, чтобы сделать отпечаток электропроводящим его покрывают графитом. После этого его помещают в раствор в качестве катода и осаждают на нем тот или иной металл. Таким образом получают металлическую копию предмета. При помощи электролиза получают алюминий. Электролизом пользуются для получения чистых металлов (рафинирование меди).