**ФИЗИКА НЕПРЕРЫВНОГО**

**15. ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ**

**15.1. Описание физических полей.**

В восьмой главе было введено понятие поля, сформулирована концепция близкодействия, принятая в современной физике, и рассмотрены четыре вида взаимодействия, т.е. четыре вида полей. В настоящем разделе мы рассмотрим, что такое принцип суперпозиции, чем описание поля отличается от описания вещества, какие параметры вводятся для описания всех видов полей.

Согласно концепции близкодействия, взаимодействие между телами на расстоянии осуществляется посредством особого состояния материи - поля. Тела или частицы, участвующие в взаимодействии, создают в окружающем их пространстве особое состояние - поле.

Основное отличие поля от рассматриваемых нами ранее тел или частиц заключается в том, что оно локализовано во всем пространстве. Для описания состояния частицы требовалось задать ограниченное число параметров равное числу степеней свободы. (Для материальной точки это радиус-вектор ***r***, задаваемый тремя проекциями на оси координат). Поскольку, число точек в пространстве бесконечно, бесконечно и число степеней свободы, а значит, и число параметров, которые нужно задать для описания поля. Это не означает, что в действительности нужно задавать бесконечное число параметров. Достаточно задать закон, по которому меняется поле в пространстве и начальные параметры, чтобы знать параметры поля в любой точке пространства.

Поле проявляется в силовом воздействии на тела или частицы, в него помещенные. Т.е. на частицу или тело в любой точке пространства, где имеется поле, действует сила ***F***. Одной из важнейших количественных характеристик поля, является *напряженность*. Напряженность поля определяется как отношение силы, действующей на тело, к величине той количественной характеристики, которая участвует в создании поля и определяется полем, поэтому напряженность называют силовой характеристикой поля. Существенно, что напряженность поля является векторной величиной, так же как и сила, через которую она определяется.

Чтобы понять сказанное, рассмотрим примеры. Электрическое поле создается зарядами *Q*. Значит, напряженность электрического поля равна отношению силы, действующей на заряд *q*, к величине этого заряда. Напряженность электрического поля обозначается как ***Е*** и она равна: ***E***=**F***/q*. Напряженность гравитационного поля определяется как ***E*** = ***F****/m*. Магнитное поле создается движущимися зарядами (или токами); в природе отсутствуют магнитные заряды. С точностью до констант, определяемых выбором системы единиц, напряженность магнитного поля ***H*** можно определить как отношение силы, действующей на проводник с током c длиной, равной единице к величине тока *I*, протекающего через проводник: ***H*** = ***F****/ I.*

В чем же состоит преимущество описания полей на языке напряженностей? Может было бы проще и удобнее просто задать силу, действующую на тело в каждой точке? Дело в том, что сила зависит как от характеристик поля, так и от характеристик объекта, в него помещенного (его электрического заряда, массы, протекающего тока и т.п.). Напряженность же поля зависит только от свойств поля.

Таким образом, поле задано, если в каждой точке пространства известна его напряженность. На рисунках удобно изображать поле при помощи силовых линий. Силовыми линиями поля называются такие линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с вектором напряженности поля. Другими словами, силовая линия определяет направлена напряженности поля в каждой точке, через которую она проходит. Силовые линии позволяют определять также и величину напряженности поля. Силовые линии рисуют таким образом, чтобы число их, пересекающих единичную площадку численно равнялось напряженности поля в данной точке. На рис. 15.1.а изображены силовые линии поля, создаваемого положительным электрическим зарядом *Q*. Они гуще вблизи заряда, где напряженность поля больше, и реже вдали от заряда. На больших расстояниях от заряда соседние силовые линии идут практически параллельно друг - другу. Такое поле называется однородным (рис.15.1.б).

Рис.15.1

Введем еще одно важное понятие - *поток вектора напряженности* поля. Поток вектора напряженности поля - Φ через площадь *S* определяется числом силовых линий, пересекающих через эту площадь. Отметим, что поток вектора напряженности - скалярная величина. Существуют более строгие определения этого понятия, но на данный момент вполне достаточно, что поток численно равен числу силовых линий пересекающих рассматриваемую поверхность.

Очевидно, что величина потока вектора определяется взаимным направлением силовых линий и площади S. На рис.15.1б изображены две площади *S1* и *S2*. Площади различны, но количество силовых линий, их пересекающих, одинаково, следовательно потоки вектора напряженности одинаковы. Введем вектор ***S***, численно равный площади *S*, и направленный перпендикулярно ей. Тогда поток вектора напряженности Φ*Е* однородного поля ***Е*** будет равен скалярному произведению векторов ***Е*** и ***S***:

, где *α* - угол между векторами ***Е*** è ***S.*** Из этого определения следует, что поток вектора через площадку, параллельную силовым линиям поля, равен нулю.

Другой важнейшей характеристикой поля может быть его *потенциал*. Это понятие можно ввести лишь для полей консервативных сил (см. раздел 11). Потенциал поля - ϕ определяется как отношение потенциальной энергии тела в поле, к величине той количественной характеристики, которая участвует в создании поля и определяется полем, поэтому потенциал называют энергетической характеристикой поля. Существенно, что потенциал поля - скалярная величина.

Снова зададим себе вопрос, чем же удобно описание полей на языке потенциалов? Может было бы проще и удобнее вместо потенциала просто задать величину потенциальной энергии тела в каждой точке? Ответ на этот вопрос будет почти таким же, как и для напряженности поля. Дело в том, что потенциальная энергия зависит как от характеристик поля, так и от характеристик объекта, в него помещенного (его электрического заряда, массы, протекающего тока и т.п.). В то время, как потенциал зависит только от свойств поля.

Потенциал принято графически изображать *эквипотенциалами* *или эквипотенциальными поверхностями*, т.е. поверхностями равного потенциала. При перемещении по такой поверхности потенциальная энергия тела остается неизменной, следовательно, силы поля в этом случае работы не совершают. Вспомним определение механической работы: , где *α -* угол между направлением силы ***F*** и перемещения ***l***. Эта работа может быть равной нулю лишь в том случае, если ***F***⊥***l***, т.е. угол ∠*α* = 90О. Поскольку напряженность поля совпадает по направлению с силой, перемещение лежит на эквипотенциальной поверхности, сказанное обозначает, что линии напряженности всегда ортогональны эквипотенциальным поверхностям.

Чем ближе друг к другу расположены эквипотенциальные поверхности, тем больше напряженность поля. На рис.15.2.б приведен пример эквипотенциальных поверхностей.

Вспомним связь силы с потенциальной энергией - формулу (11.12). Если левую и правую часть этого равенства разделить на величину той количественной характеристики, которая участвует в создании поля, то получится формула, выражающая связь напряженности поля с его потенциалом:

.

Аналогичным образом из (11.8) получим формулу для связи потенциала поля с его напряженностью:

.

Эти формулы позволяют по заданному в каждой точке потенциалу поля восстановит его напряженность и наоборот.

Обратимся к очень важному в теории поля принципу - принципу суперпозиции. В общем случае, принцип суперпозиции - это допущение, согласно которому результирующий эффект сложного процесса воздействия эквивалентен сумме эффектов от каждого воздействия в отдельности. Разумеется это определение предполагает, что эффекты не влияют друг на друга. С принципом суперпозиции мы сталкивались в школьном курсе механики и электростатики. Если на частицу, или тело действует несколько сил, то их можно заменить одной - векторной суммой всех сил.

Сформулированный принцип не является фундаментальным, или универсальным. Он справедлив, если система описывается линейными уравнениями. К системе, описываемой нелинейными уравнениями, т.е. меняющейся под действием внешних эффектов, принцип суперпозиции неприменим.

Поясним вышесказанное примером. Пусть в пространстве имеется равновесное распределение электрических зарядов, создающих всюду вокруг себя электрическое поле. Что случится, если в это поле внести еще один электрический заряд? Если внесенный заряд будет очень мал, то принцип суперпозиции для результирующего поля будет иметь место. Однако, если этот заряд велик, то он может привести в движение и переместить все имеющиеся заряды. Вследствие этого окажется, что первоначальное поле сильно исказится, и это изменение не будет описываться в рамках принципа суперпозиции.

В общем случае можно утверждать, что принцип суперпозиции справедлив, если наложение полей не приводит к перемещению в пространстве источников этих поле.

Электромагнитное поле в вакууме удовлетворяет принципу суперпозиции. В силу этого принципа электрическое или магнитное поле, создаваемое системой зарядов или токов, равно сумме полей, создаваемых этими зарядами или токами в отдельности. Для электромагнитного поля в веществе, принцип суперпозиции может нарушаться, например, если постоянные, описывающие свойства среды (диэлектрическая или магнитная) зависят от величины поля.

Примером нарушения принципа суперпозиции может служить магнитное поле в ферромагнетике. Другой пример - свет (сильное световое поле) в среде. Такое поле может генерировать в среде за счет нелинейного взаимодействия с ней свет на длине волны в два, три или более раз меньшей. Слабое гравитационное поле с хорошей точностью подчиняется принципу суперпозиции. Сильное же гравитационное поле не подчиняется принципу суперпозиции, поскольку оно описывается нелинейными уравнениями Эйнштейна.

Разделы физики, которые изучают явления, в которых нарушается принцип суперпозиции, обычно называют нелинейными. Например, нелинейная оптика. В дальнейшем ограничимся рассмотрением слабых полей (гравитационных и электромагнитных), к которым принцип суперпозиции применим.

. **Поля центральных сил.**

В этом разделе, мы рассмотрим так называемые поля центральных сил. Это поля , силы взаимодействия для которых зависят только от расстояния между взаимодействующими телами и направлены вдоль линии взаимодействия. Мы будем рассматривать квазистационарные поля, т.е. такие поля, которые либо не меняются со временем, либо меняются, но медленно по сравнению с рассматриваемыми явлениями. К рассматриваемым поля в первую очередь относятся гравитационные и электростатические поля.

Поведение гравитационных и электростатических полей похоже друг на друга. То объясняется тем, что в основе описания обеих полей лежат схожие законы: çàêîí âñåìèðíîãî òÿãîòåíèÿ Ньютона и закон Кулона. В векторном виде мы записывали их следующим образом:

**F**тяг = ( -g) ( M m / r2) (**r**/r) (15.4)

**F**кул = (1/4pe0 ) (Qq/r2) (**r**/r) (15.5)

Если не считать коэффициентов перед формулами (-g) и (1/4pe0) (которые могут иметь другой вид в других системах единиц), законы похожи. Сила тяготения **F**тяг (сила притяжения между двумя телами) прямо пропорциональна массам M и m тел, обратно пропорциональна квадрату расстояния ìåæäó телами r и направлена вдоль линии, соединяющей тела (**r**/r). Кулоновская сила **F**кул (сила взаимодействия между зарядами ) прямо пропорциональна зарядам Q и q, обратно пропорциональна квадрату расстояния ìåæäó зарядами r и направлена вдоль линии, соединяющей заряды (**r**/r).

В дальнейшем нам будет удобно остановится подробнее на одном виде взаимодействия ( электростатическом или гравитационном), подразумевая, что все наши выводы будут справедливы и для другого взаимодействия (поля).

В электродинамике при описании электрических полей используют другую форму записи закона Кулона. На называется теоремой Остроградского-Гаусса. Рассмотрим ее. Напряженность электрического поля точечного заряда Q на расстоянии r от него определяется из закона Кулона и равна:

***E*** *=* ***F****/q = (1/4pe0)(Q/r )(****r****/r)* (15.6)

Найдем поток вектора напряженности электрического поля через поверхность, внутри которой находится заряд Q , - ФЕ. Окружим поверхность сферой радиусом R. Площадь сферы 4pR. Поток вектора напряженности через эту сферу численно равен количеству силовых линий, проходящих через нее. Силовые линии перпендикулярны поверхности сферы, cos(**SE**)=1 и, значит, их число равно произведению площади сферы на напряженность поля на поверхности сферы:

*ФЕ = (4pR2 ) (1/4pe0 ) (Q/R2 ) = Q/ e0* (15.7)

Если вместо сферической, мы возьмем произвольную замкнутую поверхность, через нее будет проходить столько же силовых линий, сколько и через сферу. В силу принципа суперпозиции теорема применима и к произвольному числу зарядов внутри поверхности. Чтобы найти поток вектора напряженности при произвольном числе зарядов внутри поверхности, надо просуммировать заряды внутри ее. Другими словами: *Поток вектора напряженности через произвольную поверхность равен алгебраической сумме зарядов внутри этой поверхности, деленной на диэлектрическую проницаемость вакуума.*

Теорема Остроградского-Гаусса имеет наглядный физический смысл. Она утверждает, что силовые линии электростатического поля начинаются и заканчиваются на зарядах. Если внутри рассматриваемой поверхности зарядов нет, то число входящих в нее силовых линий равно числу выходящих и суммарный поток вектора напряженности равен нулю.

Эта теорема используется в электростатике для решения многих задач. Рассмотрим, как с ее помощью определить напряженность электрического поля вблизи равномерно заряженной поверхности. Пусть у нас есть бесконечно большая равномерно заряженная плоскость. Если заряды положительны, то силовые линии выходят из плоскости и расположены перпендикулярно ей (см.рис.15.2).

Рис.15.2

Обозначим через =q/s поверхностную плотность заряда, т.е. заряд, приходящийся на единицу площади. Выделим на плоскости окружность Ds и построим на ней как на основании два цилиндра по обе стороны поверхности. Высота цилиндров равна r. Боковые стенки цилиндров перпендикулярны поверхности и совпадают с линиями напряженности электрического поля. Значит поток вектора напряженности через них равен нулю. Применим теперь к цилиндру теорему Остроградского-Гаусса. Полный поток вектора напряженности электрического поля равен: ФЕ *=* Q/e0=Ds /e0 . С другой стороны, чтобы найти его, надо просуммировать потоки вектора напряженности через все стенки цилиндра. Черезбоковые стенки он равен нулю. Поток вектора напряженности через торцевые стенки равен: Е Ds  Ds/e0 . Отсюда находим, что напряженность поля не зависит от расстояния до поверхности и равна : E = /e0 .

Эту же задачу можно, в принципе, решить, используя формулу 15.6. Но, для решения задачи с ее помощью потребовалось бы применение раздела высшей математики, связанного с векторным анализом и поверхностными интегралами.

Электростатическое и гравитационное поле являются полями центральных сил, т.е. сил, величина которых зависит только от расстояния между взаимодействующими телами и направлены вдоль линии, соединяющей тела. Такие поля являются полями консервативных сил . Покажем это на примере гравитационного поля вблизи поверхности Земли. Силовые линии гравитационного поля вблизи поверхности Земли параллельны друг другу. Найдем работу, совершаемую при перемещении тела, массой m из точки 1 в точку 2 (см. рис. 15.3).

Рис.15.3

Расстояние между точками будем считать пренебрежимо малым по сравнению с расстоянием до центра земли. В этом случае сила тяготения одинакова во всех точках траектории ,равна весу тела Р и направлена вертикально вниз: **F** = **P** =m**g** = m (g M / R 2 ) **e,** где R радиус Земли, **e** -единичный вектор **e**= -**r**/r.

Направим ось координат OZ вдоль силовых линий гравитационного поля âåртикально вниз. По определению, работа, совершаемая при перемещении тела массой m из точки 1 в точку 2 , ( где точка 1 расположена на высоте H1 , а точка 2 на высоте H2 )равна:

A12 = **F** d**r** = F dr cos(Fdr) = F dZ = F(H1-H2)=P(H1-H2) (15.8).

Работа не зависит от траектории пути, а определяется начальным и конечным положением тела. Тем самым мы доказали, что рассматриваемые поля являются полями консервативных сил. Работа этих полей на замкнутой траектории равна нулю.

Для поля консервативных сил можно ввести потенциальную энергию. В каждой точке поля консервативных сил она равна работе, которую нужно затратить на перемещение тела из бесконечности в данную точку. В случае электрического поля перемещаемым телом является заряд. При описании электрических полей вместо потенциальной энергии точки чаще используют понятие потенциала в точке **r** : j(**r**) . Потенциал определяется как отношение потенциальной энергии (Eпот) заряда q в точке к величине самого заряда:

j(**r**) = Eпот(**r**) / q =Ar /q (15.9)

Из этого определения следует, что потенциал является скалярной функцией. Причем, у этой функции аргументом служит точка в пространстве, которая может задаваться вектором.

Свяжем между собой потенциалы и работу по перемещению заряда. Пусть мы перемещаем заряд q из точки 1 в точку 2 в электрическом поле. Работа по перемещению такого заряда равна разности потенциальных энергий поля в точках 1 и 2:

A 12= Eпот(2) - Eпот(1) = [(2) - 1)] q=*U* q (15.10)

Здесь разность потенциалов мы обозначили как *U* , которую обычно называют просто напряжением. С другой стороны, работа по определению равна :

A 12= **F**d**r=**q**E**d**r =**q **E**d**r=**q[(2)-(1)**] (**15.11)

Òåì ñàìûì ìû ñâÿçàëè напряженность электрического поля с разностью потенциалов. Величину **E**d**r** называют циркуляцией вектора напряженности электрического поля на участке кривой 1-2. Если заряд перемещается по замкнутой кривой, т.е. вышел из точки 1 и вернулся в точку 1, то работа по его перемещению равна нулю. Электростатическое поле- поле консервативных сил. Но это означает, что циркуляция вектора напряженности электрического поля на замкнутой кривой равна нулю. Тем самым мы доказали еще одну важную теорему электростатики о циркуляции вектора напряженности электрического поля.

В качестве примера рассмотрим потенциал точечного заряда +Q на расстоянии r0 от него. Пусть пробный заряд +q двигается по прямой, проходяшей через заряд Q, из бесконечности в точку r0. Работу, затраченную на перемещение заряда можно определить по формуле 15.5 с учетом того, что заряд двигается вдоль силовой линии, т.е. скалярное произведение **F**d**r** =Fdr: A r = Fdr = (1/4e0) Qq (1/r) dr = (1/4e0)Qq(1/r), откуда потенциал точечного заряда (r) =1/4e0Q /r.

При графическом описании электрических полей часто пользуются эквипотенциальными линиями или поверхностями, которые определяют поверхность с одинаковым потенциалом . Для точечного заряда линии эквипотенциальной поверхности на плоскости - просто концентрические окружности, как это показано на рис.15.1. При движении заряда по эквипотенциальной поверхности работа не совершается, как это следует из формулы 15.11. Для того, чтобы работа при перемещении заряда в электрическом поле равнялась бы нулю, требуется, чтобы заряд двигался перпендикулярно силовым линиям электрического поля (тогда cos(**F**d**r**)=0 и работа равна 0). Т.е. в общем случае линии эквипотенциальной поверхности перпендикулярны в каждой точке линиям напряженности электрического поля.

Предположим, мы сообщили некоторый заряд проводнику. Что будет происходить? Одноименные заряды будут отталкиваться и стремится расположится на поверхности проводника. Но заряды не могут двигаться бесконечно долго в проводнике, иначе мы получили бы вечный двигатель, т.е. нарушился бы закон сохранения энергии. Заряды расположатся таким образом, чтобы напряженность электрического поля, направленная вдоль каждой точки поверхности по касательной стала бы равной нулю. Линии напряженности электрического поля в каждой точке поверхности будут перпендикулярны ей. Тогда движение зарядов по поверхности прекратится. Такой процесс произойдет очень быстро. Поверхность проводника станет эквипотенциальной, поскольку в каждой точке поверхности линии напряженности электрического поля будут перепендикулярны ей.

**Вихревые поля.**

Наряду с описанными выше полями (электростатическими и гравитационными) существует другой вид полей, силовые линии которых нигде не начинаются и нигде не заканчиваются, они замыкаются сами на себя. Такие поля называются вихревыми. Они названы так из-за сходства силовых линий в виде концентрических окружностей с вихрем. Рассмотрим особенности этих полей. Начнем с простейшего - магнитного поля. Стационарное магнитное поле создается движущимися зарядами.

Из школьного курса хорошо известны силовые линии естественных магнитов. Их вид изображен на рис.15.4а. Такой же вид полей можно получить, используя замкнутый проводник, по которому течет ток. Поле кругового витка с током изображено на рис.15.4б. Силовые лини поля

Рис.15.4

образуют замкнутые кривые. Их направление определяется по правилу правого буравчика. Если ручку буравчика вращать по направлению тока в витке, то острие показывает направление силовых линий. Стационарное магнитное поле создается движущимися зарядами. На рис.15.5 показаны силовые линии бесконечно длинного проводника с током. Они представляют концентрические окружности. Направление силовых линий также можно определить с помощью правила буравчика. Для этого надо направить острие буравчика по направлению тока, тогда направление вращения ручки буравчика совпадет с направлением силовых линий.

Рис.15.5

Правило буравчика - мнемоническое правило, позволяющее просто определять направление силовых линий магнитного поля. Существуют строгие законы, позволяющие определять величину и направление силовых линий произвольного по форме проводника с током.

Напряженность магнитного поля определяется законом Био-Саварра-Лапласа. Мы не будем рассматривать в явном виде этот закон. В принципе, с его помощью можно рассчитать напряженность магнитного поля, создаваемую любым проводником с током. Так напряженность магнитного поля бесконечно длинного проводника с током на расстоянии r от него равна: H=I/2pr.

На достаточно удаленном расстоянии от проводника с током магнитное поле можно считать однородным. Т.е. силовые линии такого поля расположены параллельно друг от друга. На проводник с током, помещенный в однородное магнитное поле действует сила. Величина силы определяется по закону Ампера. Для участка проводника с током, длиной L его можно записать в векторном виде в системе единиц СИ как:

***F*** *= m0 I [* ***H L*** *]* (15.12)

Çäåñü *m0* - постоянная , обусловленная выбором системы единиц (СИ), **L** -проводник с током I , который задается в векторном виде, так как имеет направление в пространстве. Его направление совпадает с направлением движения тока, т.е. положительных зарядов.

Из 15.12 следует, что на проводник с током в однородном магнитном поле действует сила, направленная перпендикулярно вектору напряженности магнитного поля **H** и направлению движения тока (проводника с током **L** ). В этом заключается принципиальное отличие силового воздействия вихревого магнитного поля на пробный элемент от поля консервативных сил.

Вихревыми бывают не только магнитные, но и электрические поля. Действительно, возьмем проводник с током в виде кольца и поставим внутрь него батарейку. Заряды (носителями зарядов в проводниках являются электроны) будут двигаться по кольцу, создавая ток. Величина тока I определяется известным вам законом Ома:

*I = E / (rе +R)* (15.13),

где *Е* - электродвижущая сила (ЭДС) батареи, R и *rе* - сопротивление проводника и внутренне сопротивление источника ЭДС.

Рассмотрим, что происходит в проводнике. Как мы знаем, электроны двигаются вдоль силовых линий электрического поля. В рассматриваемом нами проводнике электроны двигаются по замкнутой кривой, образуемой проводником. Значит в проводнике реализуется такое электрическое поле, которое заставляет двигаться электроны по замкнутой кривой.

Следовательно, и силовые линии электрического поля тоже представляют из себя замкнутые кривые. Т.е. электрическое поле в проводнике также является вихревым полем. Электростатическое поле способно перемещать заряды, но только до того момента, пока перераспределение зарядов не скомпенсирует поле. После этого заряды будут оставаться неподвижными. Поле в проводнике с током стационарно и вызывает стационарное движение зарядов. Значит это не электростатические поля, а какие-то другие. Такие поля, способные создавать стационарное движение зарядов, в отличие от электростатических, обычно называют электрическими полями, создаваемыми сторонними силами. Сторонними, потому, что электрические заряды сами не способны создать такие поля. Соответственно, силы, вызывающие стационарное движение зарядов - сторонними силами. Электрическое поле сторонних сил совершает работу при передвижении зарядов по замкнутому контуру. Она равна произведению тока в контуре на ЭДС и на время, в течении которого шел ток: А=I*E*Dt.

Электрические поля сторонних сил могу быть созданы за счет различных видов энергий. Механической, тепловой , химической , ядерной и других. Механическая энергия, вращающая генераторы с током превращается в электрическую. Батарейки или аккумуляторы работают за счет химических реакций. Ядерные батарейки работают за счет ядерной энергии, высвобождаемой при распаде или превращении одних ядер в другие.

Возвратимся теперь назад и дадим определение ЭДС. ЭДС , действующая в контуре с током, численно равна работе А, совершаемой при перемещении единичного заряда q0 по контуру :

*E*=A/q0 (5.14)

Ìîæíî äàòü åùå îäíî, определение ЭДС. Электрическое поле, создаваемое сторонними силами, можно обозначить как **Е**ст. Работа, совершаемая при перемещении заряда по контуру А равна:

A= **F**d**r =** q0 **E**ст d**r =** q0 **E**ст d**r.**

Здесь интегрирование берется по контуру, по которому течет ток.

В соответствии с определением **ЭДС (**15.14.), ЭДС *Е* равна:

*E* = A/q0 = **Е**ст d**r .**

Другими словами, ЭДС равна циркуляции вектора напряженности электрического поля сторонних сил. В отличие от электростатического поля, она не равна нулю на замкнутом контуре, а равна ЭДС, действующей на данном контуре. Поскольку циркуляция вектора напряженности электростатического поля равна нулю, добавления 0 в дальнейшем мы не бу

Мы увидели, что работа, совершаемая электрическим полем не равна нулю на замкнутом контуре, если в нем действуют сторонние силы, задающие ЭДС. Таким образом , электрические поля сторонних сил, которые являются вихревыми полями - неконсервативные поля.

То же самое можно сказать и о магнитных полях. Если расположить провод с током в магнитном поле так, чтобы сила, действующая на него со стороны магнитного поля совпадала бы с направлением перемещения, то работа по перемещению такого проводника, совершалась бы неконсервативными силами.

Вихревые электрические поля могут реализовываться за счет других полей - магнитных. Английский ученый М.Фарадей в 1831 году и независимо от него американский ученый Дж.Генри в 1832 году открыли закон электромагнитной индукции. Сейчас его называют законом электромагнитной индукции Фарадея. Сформулируем его в том виде, который нам удобен в дальнейшем. Если менять поток индукции магнитного поля ФН, проходящего через проводник, то в проводнике возникает ЭДС, которую принято называть ЭДС индукции. Математическая формулировка его такова:

*E* = - m0 dФН / dt = **E**d**r** = - m0 dФН / dt (15.15)

ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения потока индукции магнитного поля, взятой с обратным знаком. С другой стороны, ЭДС равна циркуляции вектора напряженности электрического поля и мы можем написать: *E*= **E**d**r** = - m0dФН / dt. Эта форма записи закона электромагнитной индукции Фарадея была введена Д.К. Максвеллом и входит в систему уравнений Максвелла, описывающих электромагнитные поля.

Закон электромагнитной индукции не говорит о том, за счет чего меняется поток индукции магнитного поля. Он может менятся как за счет величины магнитного поля, так и за счет изменения площадки, через которую проходит магнитный поток.

Поясним вышесказанное примерами. На рис.15.6 нарисован виток провода, помещенный в магнитное поле . Виток присоединен к токосъемникам. Если мы будем вращать виток, то в зависимости от его положения, поток индукции магнитного поля будет меняться и в нем генерируется ЭДС. Эта ЭДС снимается с токосъемников и мы получаем генератор переменного тока.

Второй пример. Пусть мы имеем в пространстве переменное магнитное поле **H**=**H**0coswt. Это поле генерирует вокруг себя переменное электрическое поле **E** =**E**0 coswt. Переменное электрическое поле также вихревое. Его силовые линии образуют кольца, как это показано на рис.15.7. В свою очередь, как мы рассмотрим несколько позднее, переменное электрическое поле генерирует переменное же магнитное поле и эта цепочка продолжается в пространстве. Образуется новый вид поля- электромагнитное поле, которое распространяется в пространстве как электромагнитные волны.

Рис.15.6 Рис.15.7

В заключении этого раздела рассмотрим систему уравнений Максвелла, которая описывает единым образом все электрические и магнитные явления. Эта система была получена Д.К. Максвеллом в 60 годах прошлого столетия на основе обобщения эмпирических законов электрических и магнитных явлений и идей М.Фарадея, что взаимодействие между зарядами осуществляется посредством электромагнитных полей. Фактически мы уже рассмотрели большую часть уравнений.

Первыми двумя уравнениями являются рассмотренные нами уравнения о потоках индукции электрического и магнитного поля. Поток индукции электрического поля через замкнутую поверхность равен заряду внутри этой поверхности , деленному на диэлектрическую постоянную вакуума. Поток индукции магнитного поля через замкнутую поверхность равен нулю. Эти уравнения были обобщены Д.Максвеллом на случай переменных полей. Т.е. они справедливы и могут быть применены как к постоянным, так и к переменным поля. Физический смысл этих уравнений достаточно нагляден. Электрические поля могут начинаться и заканчиваться только на зарядах. Электрическое поле может быть центральным и вихревым. Магнитные поля всегда начинаются и заканчиваются сами на себе. Они всегда вихревые.

Третье уравнение Максвелла - обобщение закона электромагнитной индукции Фарадея. Оно связывает магнитное и электрическое поле. Его следствием является возникновение вихревого переменного электрического поля при наличие меняющегося потока индукции магнитного поля.

Четвертое уравнение Максвелла базируется на рассмотренной нами теореме о циркуляции вектора напряженности магнитного поля: циркуляция вектора напряженности магнитного поля по замкнутому контуру равна току (току проводимости), проходящему через этот контур. Теорема справедлива как для постоянных, так и для переменных магнитных полей. Однако, в случае переменных магнитных полей , Максвелл ввел наряду с током проводимости ток смещения. Ток смещения пропорционален скорости изменения потока индукции электрического поля. Фактически это означает, что , если имеется переменное электрическое поле, то оно генерирует переменное магнитное поле. Те самым третье и четвертое уравнения Максвелла связывают между собой переменные электрические и магнитные поля.

Система уравнений Максвелла лежит в основе ряда разделов физики. В первую очередь - классической электродинамики. Электродинамика описывает поведение и взаимодействие постоянных и переменных токов и зарядов, распространение полей ( электрических, магнитных и электромагнитных) в пространстве.

Среди всех известных видов взаимодействия электромагнитное занимает первое место по широте и разнообразию. Это связано с тем, что все тела состоят из положительно и отрицательно заряженных частиц, электромагнитное взаимодействие между которыми на много порядков сильнее гравитационного , и именно оно ответственно за многообразие физических и химических процессов между атомами и молекулами.

**16.КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ**

**16.1. Колебания, виды колебательных процессов.**

В природе и в более сложных структурах, таких как общество, мы часто встречаемся с процессом изменения какого либо параметра во времени. Мы наблюдаем смену дня и ночи, сезонов в году, периодических изменений стоимости акций и так далее. Если изменения какого-либо параметра повторяются во времени, их принято называть колебательными процессами. Имеющиеся у нас чувства - зрение и слух также связаны с колебаниями. Более 90% информации человек получает при помощи зрения и слуха, т.е. при помощи восприятия колебаний электромагнитного поля - света и колебаний давления воздуха - звука.

Перейдем к более строгим качественным и количественным формулировкам колебаний. *Колебательным* называется такой процесс, при котором состояние системы, изменяясь, многократно повторяется во времени. Наиболее распространены и детально изучены периодические колебательные процессы. В этих процессах система через определенный промежуток времени, называемым *периодом колебаний* (Т), возвращается в исходное состояние. Примером периодического колебательного процесса могут служить движения маятника, качелей, прыгающего мяча и т.д.

В общем случае колебание может совершать материальное тело, физический параметр, характеризующий поле или среду, а также, любой параметр, описывающий сложную систему, например, общество.

Если физическая величина *X* изменяется по закону:

где *A* - амплитуда, ω0=2π/Т − круговая частота колебаний, ϕ0 - начальная фаза, то такие колебания называются *гармоническими*.

Рассмотрим элементы динамики гармонических колебаний. Для простоты сначала остановимся на механических колебаниях, для которых *Х* имеет смысл смещения материальной точки из положения равновесия. Из (18.1) дифференцированием найдем скорость и ускорение этой материальной точки.

Найдем силу, под действием которой совершаются гармонические колебания. Второй закон Ньютона, описывающий движение точки вдоль оси (*ох*), принимает вид:

Здесь *k* = *m⋅ω2* − коэффициент пропорциональности между приложенной силой и вызываемым ею смещением. Для упругих систем он называется жесткостью или коэффициентом упругости, для других систем, подчиняющихся этому же уравнению - коэффициентом квазиупругости. Таким образом, гармонические колебания совершаются силой, пропорциональной отклонению тела от положения равновесия и направленной к положению равновесия. Коэффициент *k* определяет собственную частоту и период колебаний:

Упругие и квазиупругие силы всегда являются центральными, так как зависят только величины смещения тела. Следовательно, эти силы являются консервативными. Для них оказывается возможным ввести потенциальную энергию, которая равна потенциальной энергии упругой (квазиупругой) деформации.

. Запишем выражение для кинетической энергии колеблющегося тела.

Обратим внимание на то, что оба вида энергии изменяются в пределах от нуля до максимального значения, причем максимальные значения кинетической и потенциальной энергий тела одинаковы. Кинетическая и потенциальная энергия меняются в противофазе. В моменты времени, когда тело проходит положение равновесия, вся его энергия определяется кинетической энергией. В моменты времени, когда амплитуда тела становится максимальной, его энергия определяется потенциальной энергией. Полная механическая энергия равна:

Полная механическая энергия, как и следовало ожидать, оказалась постоянной.

Кроме консервативных сил, в реальной системе могут действовать и неконсервативные силы, например силы трения. При их наличии механическая энергия системы переходит во внутреннюю энергию, т.е. идет на нагрев тела. Полная механическая энергия в этом случае не сохраняется, она убывает со временем. Значит, должна уменьшатся и амплитуда колебаний системы *A*. Если силы трения прямо пропорциональны скорости тела *Fтр*=*b⋅υ* (вязкое трение), амплитуда колебаний *A(t)* зависит от времени следующим образом:

.

Амплитуда колебаний убывает по экспоненте, параметры которой определяются начальной скоростью и силами трения. Получившиеся колебания называются затухающими. Отметим, что затухающие колебания протекают медленнее, чем колебания в той же системе без трения. Их частота немного меньше, а период, соответственно, немного больше.

.

Рис.18.1 Рис.18.2

Для того, чтобы амплитуда колебаний не уменьшалась под вследствие потерь энергии, в систему необходимо добавлять энергию извне. Добавляемая энергия должна компенсировать потери. Существуют разные способы передачи энергии в систему. Чаще всего в технике инициируют так называемые вынужденные колебания. Вынужденные колебания возникают под действием внешней периодической силы с частотой Ω. Эта частота может не совпадать с частотой собственных (ω) или затухающих (ω′) колебаний. Колебания начинаются сразу на двух частотах: вынужденные на частоте Ω и затухающие на частоте ω′. Затухающие колебания быстро затухают, и остаются только незатухающие вынужденные колебания. Амплитуда вынужденных колебаний является функцией частоты вынуждающей силы Ω. Эта зависимость приведена на рис.18.2 для систем с большим (1) и малым трением (2). Если частота вынуждающих колебаний - Ω близка к частоте собственных колебаний системы - ω, то наступает так называемое явление *резонанса.* При резонансе амплитуда колебаний системы максимальна.

Если потери, вызванные силами трения, достаточно малы, то амплитуда колебаний может стать такой большой, что система может даже разрушится. Известен случай разрушения моста под действием ветра, вызвавшего сильные колебания. В авиации известен термин, называемый флаттером, когда амплитуда колебаний деталей самолетов становится настолько большой, что самолеты разрушаются в воздухе.

Существуют и другие способы передачи энергии системе для осуществления периодических незатухающих колебаний. В простейшем случае, который имеет место в механических часах, энергия механической пружины периодически с частотой 1 Гц подводится к маятнику.

Интересен случай возбуждения незатухающих колебаний в системе, с помощью энергии, подводимой непрерывно. Примером возникновения таких колебаний - *автоколебаний* могут служить трубы органов и других музыкальных инструмент иов. Поток воздуха проходит с постоянной скоростью через органную трубу и передает ей энергию, за счет которой труба издает звуки определенной тональности. Как можно в этом случае объяснить процесс возникновения периодических колебаний? Àâòîêîëåáàíèÿ возможны только тогда, когда энергия, передаваемая системе нелинейно зависит от какого-то параметра, например от скорости системы. В разные моменты времени скорость стенок трубы, с которой соприкасается поток воздуха, различна. И поток воздуха с разной силой «трется» о стенки, т.е. передает ей разную энергию. Колебания стенок трубы описываются обычными уравнениями колебаний (18.1-18.3) Следовательно, энергия, передаваемая потоком воздуха органной трубе также будет меняться по закону гармонического колебания. В конечном счете процесс передачи энергии от потока воздуха к стенкам трубы также будет носить периодический характер. Период этого процесса определяется собственными частотами колебаний трубы. Имеет место явление резонанса, при котором амплитуда колебаний становится очень большой при сравнительно небольших затратах энергии. Именно этим явлением объясняется «флаттер» è разрушение моста сильным потоком воздуха.

**18.2 Распространение колебаний, звуковые и электромагнитные волны.**

*Упругой* называется среда, которая может сопротивляться деформации. Возьмем, например, металлическую линейку. Закрепим один ее конец, а на второй подействуем с некоторой силой. Для того, чтобы согнуть линейку требуется прикладывать силу, которая уравновешивается силами, действующими со стороны соседних участков линейки. Через некоторое время после прекращения действия внешней силы линейка разогнется и перейдет в прямое состояние. Это пример действия упругих сил в твердых телах. В газах также существуют упругие силы. Возьмем поршень в цилиндре и попытаемся сжать газ в цилиндре. Упругие силы, возникающие из-за избыточного давления газа, будут стремиться вернуть поршень в положение равновесия. Жидкости тоже являются упругими средами, в них тоже возникают упругие силы.

Отличие упругих сил в твердых телах от упругих сил в жидкостях и газах, заключаются в том, что, в твердых телах упругие силы действуют во всех направлениях, независимо от того, куда мы стремимся приложить силу. В газах упругие силы возникают только тогда когда мы стремимся изменить первоначальный объем газа. Другими словами, твердое тело сопротивляется изменению своего объема и своей формы, а жидкости и газы - только изменению объема.

Если заставить колебаться участок упругой среды, то под действием упругих сил эти колебания будут передаваться соседним участкам среды. Процесс распространения колебаний в упругой среде называют волнами. В общем случае волна - это процесс распространения колебаний какого-то параметра (смещения атомов в теле, давления в газах, напряженности электрического поля или еще чего-нибудь) в пространстве. В жидкостях и газах колебания могут быть направлены только вдоль направления распространения волны. Такие волны называются продольными.

В твердых телах колебания могут совершатся как вдоль направления распространения волны, так и поперек. Волны, у которых колебание совершается перпендикулярно направлению распространения называются поперечными. Примером продольных волн в газах является звук. Примером поперечных волн являются электромагнитные волны, у которых колеблются напряженности электрических и магнитных полей.

Рассмотрим процесс возникновения волн и найдем уравнение, описывающее волну. В качестве модели возьмем длинную натянутую струну или веревку. В исходном состоянии она неподвижна. В начальный момент времени *t0* начнем колебать в поперечном направлении незакрепленный конец веревки. Пусть некоторую точку смещают из положения равновесия и отпускают. Точка начинает колебаться по гармоническому закону (рис.18.3). Через некоторое время точка отойдет от положения максимального отклонения и станет перемещаться к положению равновесия. Через четверть периода колебаний точка достигнет его, минует и станет двигаться дальше к максимальному отклонению ξ*max*=*А*, равному амплитуде. Спустя некоторое время все тоже самое случится с соседней точкой. С течением времени колебание может распространиться на всю веревку. Каждая точка веревки (если пренебречь затуханием, т.е. силами сопротивления) будет колебаться по закону . Фаза колебания каждого участка веревки будет своя. По веревке будет распространяться колебание, т.е. возникнет так называемая бегущая волна.

Введем параметры, характеризующие волну. Минимальное расстояние между двумя участками веревки, колеблющимися в одинаковой фазе назовем длиной волны *λ*, см.рис.18.3. Участки веревки с постоянной фазой колебания перемещаются слева направо. Скорость перемещения постоянной фазы колебания называют фазовой скоростью - *υ*. За время, равное одному периоду колебаний − *T*, волна поробегает расстояние, равное ее длине − *λ.*

.

Поверхность, все точки которой колеблются в одинаковой фазе, называется волновой поверхностью. Геометрическое место точек, которых достигло возмущение от источника называется волновым фронтом. Эти понятия очень похожи, но не тождественны. Волновой фронт перемещается со скоростью волны, а волновые поверхности неподвижны лишь в один момент времени они совпадают друг с другом. Если, например, колонна машин едет по дороге, то первую машину можно уподобить волновому фронту, а встречающиеся на пути километровые столбы - волновым поверхностям. Пусть волна распространяется из точки О вдоль оси (*oz*). Найдем фазу волны в произвольной точке z (см.рис.18.4).

Рис.18.3 Рис.18.4

Колебание волны в точке z можно представить в виде: , где *t’* - время запаздывания колебаний в точке *z* по сравнению с колебаниями в точке О. За это время волновой фронт проходит расстояние от начала отсчета до точки z. Это время равно . С учутом имеем:

Здесь *k* - волновое число, которое показывает сколько длин волн λ укладывается на отрезке, длиной *2π*.

Полученное выражение называется уравнением бегущей волны. Оно определяет колебание волны в каждой точке пространства, являясь функцией координаты *z* и времени *t*.

Часто, кроме круговой частоты колебаний ω=*2π/T* используют циклическую частоту ν=*1/T*. Частота измеряется в Герцах, 1 Гц - это 1 колебание в секунду. В общем случае вместо смещения точки среды из положения равновесия можно ввести любой “колеблющийся” параметр. Для звуковых волн таким параметром является давление газа в данной точке пространства. Звуковые волны - продольные волны и физически сводятся к процессу распространения в газе колебаний давления. Эти колебания обычно создают путем колебаний мембраны перпендикулярно ее плоскости. Возникающие перепады давления и представляют собой звуковую волну. Область частот, которые слышит человеческое ухо лежит в диапазоне 20-20000 Гц.

Другим чрезвычайно важным видом волн являются электромагнитные волны. Электромагнитные волны могут возникать и распространятся в пустом пространстве, т.е. в вакууме. Из уравнений Максвелла следует, что переменное магнитное поле создает вокруг себя в пространстве переменное электрическое поле. В свою очередь, переменное электрическое поле создает вокруг себя в пространстве переменное магнитное поле. Этот процесс приводит к появлению в пространстве некоторой волны - электромагнитной волны. Эта волна является поперечной.

Напряженности электрического и магнитного полей волны перпендикулярны друг другу и направлению распространения волны. На рис.18.5 показаны напряженности электрического и магнитного полей в бегущей волне.

Рис.18.5

Особенностью электромагнитных волн является то, что для их распространения не требуется никакой среды. Переменные электромагнитные поля могут распространяться в вакууме.

Для количественного описания волн вводят два понятия: интенсивность волны и объемную плотность энергии волны. *Интенсивность волны* - это средняя по времени энергия, переносимая волнами через единичную площадь, параллельную волновому фронту, за единицу времени. *Объемная плотность энергии* - это энергия волн, приходящаяся на единицу объема. Волна - это процесс распространения колебаний в пространстве (в упругой среде , как это имеет место для звуковых волн, или в вакууме, как это имеет место для электромагнитных волн). Энергия колебаний определяется амплитудой и частотой. Она пропорциональна квадрату амплитуды колебаний. В системе СИ интенсивность волны выражается в Вт/м2.

Без вывода приведем выражения для интенсивности и скорости звуковой и электромагнитной волн. Для звуковой волны:

где *А* - амплитуда колебаний среды, ω - частота, *υ*, *υ*//, *υ*⊥ - скорость волны, продольной и поперечной, *ρ* - плотность среды, в которой распространяется звуковая волна, Ε - коффициент Юнга, G - коэффициент сдвига.

Распространение звука в упругой среде связано с объемной деформацией. Поэтому давление в каждой точке среды непрерывно колеблется с частотой ω вокруг некоторого среднего значения. Давление, вызванное звуковой деформацией среды называется звуковым давлением.

Наше ухо воспринимает звуковые давления неодинаково на разных частотах. Область частот ,которые воспринимает ухо лежит в диапазоне 20 - 20000 Гц. Наибольшей чувствительностью ухо обладает в диапазоне частот около 1000 Гц. На этих частотах ухо способно воспринимать звуки, звуковое давление в которых отличается на 7 порядков.

Для интенсивности электромагнитной волны справедливо:

, где Eо и Hо амплитуды напряженности электрического и магнитного полей, *ε* и *μ* диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, *εо* и *μо* диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума - постоянные, введенные в системе СИ. Скорость распространения электромагнитных волн в среде равна

, В вакууме , поэтому скорость электромагнитной волны в вакууме будет равна

.

Как видно, она расна скорости света в вакууме - *с,* что не удивительно, поскольку свет является электромагнитными волнами.

**18.3 Волновые явления: поляризация, интерференция, дифракция и дисперсия.**

Распространение волн в пространстве и их взаимодействие со средой приводит к появлению целого класса явлений, которых нет при механическом движении тел. Рассмотрим основные из них для звуковых и электромагнитных волн.

В поперечных волнах (к которым относятся электромагнитные) колебания происходят перпендикулярно направлению распространения волны. Эти колебания могут быть как упорядоченными, так и неупорядоченными. Например, колебания могут происходить только в одном выделенном направлении. Волны, у которых колебания совершаются в одной плоскости, называются плоско поляризованными.

В каждой точке пространства волна представляет собой колебание с определенной начальной фазой. Два колебания в выбранной точке пространства складываются друг с другом. Ограничимся случаем, когда складываются волны с одинаковыми частотами. Если складываются два колебания в одинаковой фазе, то амплитуда результирующего колебания максимальна и равна сумме амплитуд. Если же складываются два колебания в противофазе, то результирующая амплитуда будет минимальна и равна модулю разности амплитуд этих колебаний. При произвольной разности фаз складывающихся колебаний амплитуда результирующего колебания может меняться от нуля до максимума. Если, например, складываются два колебания с одинаковыми амплитудами и одинаковыми фазами, то результирующая амплитуда удвоится, а интенсивность возрастет в четыре раза. Если же колебания с равными амплитудами сложатся в противофазе, то колебания полностью погасят друг друга, и интенсивность результирующего колебания окажется равной нулю. Интенсивность двух складывающихся волн не равна сумме их интенсивностей. Явление стационарного во времени увеличения интенсивности волн в одних точках пространства и уменьшения в других называется интерференцией. Еще раз подчеркнем, что для наблюдения интерференции необходимо, чтобы частоты колебаний были одинаковыми. Такие волны называются *когерентными*.

Наряду с плоскими волнами, которые мы рассматривали до сих пор, существуют и другие типы волн, например, сферические или цилиндрические. Напомним, что тип волны или форма волновой поверхности определяется формой источника и законом его колебания. Сферический источник, как правило, создает сферические волны. Такие волны не имеют выделенного направления и распространяются во всех направлениях одинаково. Если в среде нет неконсервативных сил, то амплитуда колебаний таких волн убывает обратно пропорционально расстоянию, а интенсивность, соответственно, обратно пропорционально квадрату расстояния.

Введение сферических волн необходимо для понимания еще одного чисто волнового явления - *дифракции*. Ïîä дифракцией понимают огибание волнами препятствия и их захождение в область геометрической тени. Представим себе следующую ситуацию. У нас есть закрытая комната в одной из стен которой есть окно. Напротив стены с окном стоит стрелок и стреляет в него. Естественно, если пули не рикошетят, все они попадут в стенку за окном и никогда не достигнут боковых стен. Если мы рассматриваем движение материальных тел, то эти тела (в отсутствие силовых воздействий) в соответствии с первым законом Ньютона двигаются прямолинейно. Если на их пути встречаются препятствия, тела не огибают их.

По иному ведут себя волны. Волна есть процесс распространения колебаний в пространстве. Если в какой-то точке упругой среды возникнут колебания, то они за счет упругости среды передадутся в окрестные точки, т.е. возникнет сферическая волна. Как будет распространяться в пространстве волна с произвольным фронтом? Ответ на этот вопрос дал в 17-м веке Х.Гюйгенс (1629-1695), сформулировав принцип, названный его именем. Гюйгенс предложил считать каждую точку фронта волны источником сферических волн. За время *t* сферические волны распространятся на некоторое расстояние. Новым фронтом волны через время *t* будет огибающая этих сферических фронтов.

Рассмотрим два примера, иллюстрирующих принцип Гюйгенса. На рис.18.5 показано прохождение плоской волны через отверстие небольшого размера, соизмеримого с длиной волны. Слева на отверстие падает плоская волна. Какой она станет после прохождения отверстия? Разобьем отверстие на зоны размерами порядка длины волны. Каждая такая зона может рассматриваться как источник сферических волн. Пусть за время *t* сферическая волна распространится на расстояние *r*, как это показано на рисунке. Огибающая сферических волн уже не будет плоской волной. Продолжим этот процесс. Если взять достаточно большой промежуток времени *t*, т.е. рассматривать волновые поверхности на большом по сравнению с размерами отверстия расстоянии, то прошедшая через него плоская волна превратится в сферическую волну. Волна за отверстием будет распространятся во все стороны, в том числе и в область геометрической тени.

Рис.18.5

Рассмотрим другой пример, иллюстрирующий принцип Гюйгенса. Пусть плоская волна падает на границу раздела сред (1) и (2), как это показано на рис.18.6. Угол падения обозначим через ϕ1. Скорость распространения волны в первой среде равна *υ1*, во второй *υ2*. Найдем, под каким углом ϕ2 будет распространятся волна во второй среде.

В соответствии с принципом Гюйгенса каждую точку на границе двух сред мы можем считать источником вторичных сферических волн. Система симметрична и нам достаточно взять две точки А и В, которые ограничивают фронт падающей волны. Проведем из точки А прямую, перпендикулярную направлению распространения фронта волны AC. Эта прямая совпадает с фронтом волны в момент времени t.

***V***

***V В***

***С***

***D***

***А***

***1 2***

***Рис. 18.6***

Точка С фронта волны достигнет точки B в момент времени tо. Время t- to =CB/V =AB sin( y 1 )/V1 . За время t - to из точки А распространится сферическая волна с радиусом AD = (t -to ) V. Фронт волны во второй среде будет проходить через точку В и будет касателен к сфере радиусом АD. Любая точка отрезка АВ может рассматриваться как источник вторичных сферических волн. За время t - t они распространятся в среде 2 на некоторые расстояния. Касательные к окружностям этих точек и дадут прямую ВD. Во второй среде также распространяется плоская волна.

Поскольку AD = AB sin =V(t - t ) с одной стороны и с другой стороны АВ sin =V ( t - t ) , приравнивая АВ из этих уравнений и сокращая на (t - t ), ïîëó÷àåì óðàâíåíèå преломления волн на границе двух сред:

.

Скорость распространения световых волн в среде *υ* определяется коэффициентом преломления *n* этой среды и скоростью света в вакууме *с*:

.

Подставив это соотношение в уравнение (18.18), получим закон преломления света:

.

Закон преломления света был сформулирован в трудах Архимеда около двух с половиной тысяч лет назад. Наряду с законом прямолинейного распространения света и законом невзаимодействия световых волн, он является одним из основных законов оптики. Подавляющее большинство расчетов оптических систем (очков, биноклей, фотоаппаратов и т.д.) базируется на этих законах.

Значение показателя преломления *n* можно найти воспользовавшись уравнениями (18.16) и (18.17).

.

В этой формуле *ε* и *μ* − диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, соответственно. Поскольку, для всех оптически прозрачных сред *μ* ≈ 1 (с точностью до трех знаков после запятой), справедливо выражение: .

В заключение раздела рассмотрим явление *дисперсии*. Проявление его известно с незапамятных времен. Все мы наблюдали радугу в небе после дождя, любовались игрой света в драгоценных камнях. Все эти эффекты связаны с явлением дисперсии. Под явлением дисперсии понимают зависимость скорости распространения волн или коэффициента преломления среды от длины волны или частоты колебаний.

Рассмотрим опыт Ньютона по наблюдении дисперсии света (см. рис. 18.7). Он направлял параллельный пучок белого света на стеклянную призму П и наблюдал его прохождение на стоящем вдали экране Э. Призма преломляет пучок света , но по разному для разных длин волн, и на экране Э наблюдается не одно белое пятно, а спектр, включающий все цвета радуги от синего до красного.

На гранях призмы в соответствии с законом преломления свет преломляется. Коэффициент преломления стекла *n* различен для разных длин волн, т.е. *n* = *n(*λ*)*. Показатель преломления для синего света больше, чем для красного, поэтому, в соответствии с законом преломления (18.20) синий свет преломляется сильнее, чем красный.

П Э

К

С

Рис.18.7.

Кроме красного и синего цветов в естественном свете присутствуют все остальные цвета, и коэффициенты преломления для каждого из них различны. Каждый из этих лучей будет преломляться на разный угол. На экране будут наблюдаться все цвета радуги, переходящие друг в друга от красного до фиолетового.

Этот же эффект мы наблюдается при прохождении света через грани отшлифованного алмаза - бриллианта. Природный алмаз имеет очень высокую дисперсию и большое значение коэффициента преломления *n* = 2,4. Именно поэтому белый свет, преломляясь на гранях алмаза, хорошо разделяется на все цвета радуги.

В заключение подчеркнем еще раз основное отличие движения волн от движения материальных тел. Волна - это не материальное тело, а процесс распространения колебаний в пространстве. Она не локализована в какой-либо точке пространства и обладает бесконечным числом степеней свободы. Волна может обладать характеристиками, не имеющими аналогов для материальных тел, например, поляризацией. Прохождение волн в среде или пространстве сопровождается явлениями, отсутствующими при движении материальных тел: интерференцией, дифракцией, дисперсией.