

Оглавление

Введение.....	2
Глава I Волновые явления в окружающем мире.....	3
1.1. Периодические движения.....	3
1.2. Колебательные системы	4
1.3. Звуковые колебания	6
1.4. Волновые явления	8
1.5. Волновое уравнение.....	10
1.6. Скорость распространения волн.....	12
1.7. Поперечные волны.....	14
1.8. Продольные волны.....	19
1.9. Стоячие волны	21
1.10. Волны на поверхности воды	23
1.11. Уравнение волны на поверхности воды	26
1.12. Электромагнитные волны	28
1.13. Волновое уравнение для электромагнитных волн.....	32
1.14. Поляризация электромагнитных волн	35
1.15. Гравитационные волны	41
Глава II Анализ особенностей описания волновых явлений.....	43
Глава III Изучение волновых явлений в школе	47
Заключение	48
Список литературы	49

Введение

Каждый день человек встречается с волновыми явлениями. Слышит пение птиц, шелест листьев, журчание ручейка, видит волны, бегущие по воде от брошенного камня и многое другое. Но не все задумываются о том, что все эти явления представляют собой волновые движения. Волновые процессы очень распространены в природе, но различны физические причины, вызывающие их. Несмотря на большое разнообразие, в волновых процессах наблюдаются одни и те же закономерности, которые описываются одинаковыми математическими и физическими моделями и исследуются общими методами.

Оказывается, что колебательные и волновые процессы очень распространены в природе, но различны сами физические причины, вызывающие их, да и сами волны могут быть как продольными, так и поперечными, продольно-поперечными, поперечно-поперечными. Но все же, несмотря на большое разнообразие, в волновых процессах наблюдаются одни и те же общие закономерности, которые можно описать одинаковыми математическими и физическими моделями и исследовать общими методами.

В связи с этим, было бы интересно рассмотреть и проанализировать как общие закономерности волновых процессов разной природы, так и частные особенности волновых явлений в различных средах. Другими словами, важно выявить, несмотря на общие черты, основные особенности описания волновых явлений разной природы.

Этому и посвящена данная работа, в которой делается попытка анализа колебательных и волновых явлений от звуковых до электромагнитных и гравитационных.

Глава I Волновые явления в окружающем мире

1.1. Периодические движения

Среди всевозможных совершающихся вокруг нас механических движений часто встречаются повторяющиеся движения. Любое равномерное вращение является повторяющимся движением: при каждом обороте всякая точка равномерно вращающегося тела проходит те же положения, что и при предыдущем обороте, причем в такой же последовательности и с теми же скоростями. Если мы посмотрим, как раскачиваются от ветра ветви и стволы деревьев, как качается на волнах корабль, как ходит маятник часов, как движутся взад и вперед поршни и шатуны паровой машины или дизеля, как скачет вверх и вниз игла швейной машины; если мы будем наблюдать чередование морских приливов и отливов, перестановку ног и размахивание руками при ходьбе и беге, биения сердца или пульса, то во всех этих движениях мы заметим одну и ту же черту — многократное повторение одного и того же цикла движений.

В действительности не всегда и не при всяких условиях повторение совершенно одинаково. В одних случаях каждый новый цикл очень точно повторяет предыдущий (качания маятника, движения частей машины, работающей с постоянной скоростью), в других случаях различие между следующими друг за другом циклами может быть заметным (приливы и отливы, качания ветвей, движения частей машины при ее пуске или остановке). Отклонения от совершенно точного повторения очень часто настолько малы, что ими можно пренебречь и считать движение повторяющимся вполне точно, т. е. считать его периодическим.[15].

Периодическим называется повторяющееся движение, у которого каждый цикл в точности воспроизводит любой другой цикл.

Продолжительность одного цикла называется периодом.

Очевидно, период равномерного вращения равен продолжительности одного оборота.

1.2. Колебательные системы

В природе, и особенно в технике, чрезвычайно большую роль играют тела и устройства, которые сами по себе способны совершать периодические движения. «Сами по себе» — это значит: не будучи принуждаемы к этому действием периодических внешних сил. Такие колебания называют, поэтому свободными колебаниями в отличие от вынужденных, протекающих под действием периодически меняющихся внешних сил.

Если, например, периодически толкать дверь и тянуть ее обратно, то она будет открываться и закрываться, т. е. будет совершать периодическое вынужденное движение. Но сама по себе она не может двигаться периодически: если дверь толкнуть и предоставить самой себе, то движение не будет повторяющимся. Иное дело, если толкнуть или отклонить от вертикали висящий на веревке груз. Он начнет качаться, т. е. будет сам по себе совершать периодическое движение. Это и будут свободные колебания. Подобно этому в результате первоначального толчка будет периодически колебаться вода в стакане, груз, подвешенный на пружине, вагон или автомобиль на своих рессорах, качели, зажатая одним концом металлическая пластинка, натянутая струна, стрелка компаса и т. д..

Все такие тела или совокупности тел, которые сами по себе могут совершать периодические движения, или колебания, называются колебательными системами. Колебания, совершающиеся в этих системах без воздействия внешних сил, являются свободными.

В отличие от свободных колебаний, когда система получает энергию лишь один раз (при выведении системы из состояния равновесия), в случае вынужденных колебаний система поглощает эту энергию от источника внешней периодической силы непрерывно. Эта энергия восполняет потери, расходуемые на преодоление трения, и потому полная энергия колебательной системы по-прежнему остается неизменной.

Вынужденные колебания в отличие от свободных могут происходить с любой частотой. Частота вынужденных колебаний совпадает с частотой

внешней силы, действующей на колебательную систему. Таким образом, частота вынужденных колебаний определяется не свойствами самой системы, а частотой внешнего воздействия.

Примерами вынужденных колебаний являются колебания детских качелей, колебания иглы в швейной машине, поршня в цилиндре автомобильного двигателя, рессор автомобиля, движущегося по неровной дороге и т.д.

С колебательными системами приходится иметь дело не только в различных машинах и механизмах. Колебательными системами является большинство источников звука, распространение звука в воздухе возможно лишь потому, что сам воздух представляет собой своего рода колебательную систему. Более того, кроме механических колебательных систем, существуют электромагнитные колебательные системы, в которых могут совершаться электрические колебания, составляющие основу всей радиотехники. Наконец, имеется много смешанных — электромеханических — колебательных систем, используемых в самых различных технических областях.

Еще существуют гармонические колебания. Гармоническое колебание — явление периодического изменения какой-либо величины, при котором зависимость от аргумента имеет характер функции синуса или косинуса. Например, гармонически колеблется величина, изменяющаяся во времени следующим образом:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad \text{или} \quad x(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$$

где x — значение изменяющейся величины, t — время, остальные параметры — постоянные: A — амплитуда колебаний, ω — циклическая частота колебаний, $(\omega t + \varphi)$ — полная фаза колебаний, φ — начальная фаза колебаний. [5].

В реальности нет таких тел, которые бы совершали гармонические колебания. Гармонические колебания — это модель, как, к примеру, моделью является материальная точка. Однако в природе есть процессы, которые

хорошо описываются при помощи данной модели. Одним из таких процессов являются малые колебания груза, подвешенного на нити.

1.3. Звуковые колебания

Вообще человеческое ухо слышит звук, когда на слуховой аппарат уха действуют механические колебания с частотой не ниже 16 Гц, но не выше 20 000 Гц (20 кГц). Колебания же с более низкими и более высокими частотами неслышимы.

Таким образом, звук обуславливается механическими колебаниями в упругих средах и телах (твердых, жидких и газообразных), частоты которых лежат в диапазоне от 16 до 20 кГц и которые способно воспринимать человеческое ухо.

Соответственно этому механические колебания с указанными частотами называются звуковыми или акустическими (акустика — учение о звуке). Неслышимые механические колебания с частотами ниже звукового диапазона часто называют инфразвуковыми, а с частотами выше звукового диапазона, т. е. более 20 кГц — ультразвуковыми.

Если звучащее тело, например электрический звонок, поставить под колокол воздушного насоса, то по мере откачивания воздуха звук будет делаться все слабее и, наконец, совсем прекратится. Передача колебаний от звучащего тела осуществляется через воздух. Как именно происходит распространение колебаний в воздухе, мы рассмотрим позднее. Теперь же отметим только одно обстоятельство: при своих колебаниях звучащее тело попеременно, то сжимает слой воздуха, прилегающий к поверхности тела, то, наоборот, создает разрежение в этом слое. Таким образом, распространение звука в воздухе начинается с колебаний плотности воздуха у поверхности колеблющегося тела.

Но колебания плотности воздуха можно создать и без колеблющегося тела. Если, например, быстро вращать диск с отверстиями, расположенными по окружности, и продувать через них струю воздуха (рисунок 1), то позади

отверстий струя будет прерывистой, получатся периодически следующие друг за другом уплотнения воздуха. Легко убедиться, что и в этом случае слышится звук.

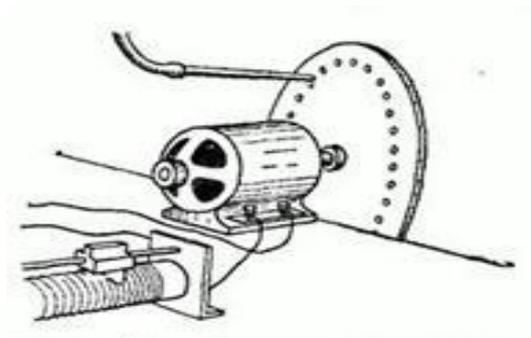


Рис. 1 Получение звука прерыванием струи воздуха

На прерывании воздушной струи основано устройство сирены. В этом источнике звука вращающийся диск располагается обычно над неподвижным диском с таким же числом отверстий, причем отверстия прорезаны наклонно. Этим достигается, во-первых, то, что подвижный диск приводится во вращение самой воздушной струей подобно колесу турбины, а во-вторых, одновременно прерывается столько струй, сколько отверстий в диске, благодаря чему звук значительно усиливается.

Сирена или даже простое устройство, изображенное на рисунке 1, удобны в опытах тем, что позволяют легко определять период звуковых колебаний. Число прерываний воздушной струи в секунду равно, очевидно, произведению числа отверстий z на число оборотов n диска в 1 с, период же равен обратной величине:

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

Так как колебания воздуха, возникающие при работе сирены, не имеют характера гармонических, то число прерываний воздушной струи (zn) не является частотой колебания. Как уже упоминалось, периодическое негармоническое движение не может быть охарактеризовано одной частотой, а представляет собой набор гармонических колебаний с частотами, кратными основной частоте $\nu = 1/T$. [15].

1.4. Волновые явления

Мы перейдем теперь к изучению распространения колебаний. Если речь идет о механических колебаниях, т. е. о колебательном движении частиц какой-либо твердой, жидкой или газообразной среды, то распространение колебаний означает передачу колебаний от одних частиц среды к другим. Передача колебаний обусловлена тем, что смежные участки среды связаны между собой. Эта связь может осуществляться различно. Она может быть обусловлена, в частности, силами упругости, возникающими вследствие деформации среды при ее колебаниях. В результате колебание, вызванное каким-либо образом в одном месте, влечет за собой последовательное возникновение колебаний в других местах, все более и более удаленных от первоначального, и возникает так называемая волна.

Механические волновые явления имеют огромное значение для повседневной жизни. К этим явлениям относится распространение звуковых колебаний, обусловленное упругостью окружающего нас воздуха. Благодаря упругим волнам мы можем слышать на расстоянии. Круги, разбегающиеся на поверхности воды от брошенного камня, мелкая рябь на поверхности озера и огромные океанские волны — это тоже механические волны, хотя и иного типа. Здесь связь смежных участков поверхности воды обусловлена не силой упругости, а силой тяжести или же силами поверхностного натяжения. В воздухе могут распространяться не только звуковые волны, но и разрушительные взрывные волны от разрывов снарядов и бомб. Сейсмические станции записывают колебания почвы, вызванные землетрясениями, происходящими за тысячи километров. Это возможно только потому, что от места землетрясения распространяются сейсмические волны — колебания в земной коре.

Огромную роль играют и волновые явления совершенно иной природы, а именно электромагнитные волны. Эти волны представляют собой передачу из одних мест пространства в другие колебаний электрического и магнитного полей, создаваемых электрическими зарядами и токами. Связь между

соседними участками электромагнитного поля обусловлена тем, что всякое изменение электрического поля вызывает появление магнитного поля, и наоборот, всякое изменение магнитного поля создает электрическое поле. Твердая, жидкая или газообразная среда может сильно влиять на распространение электромагнитных волн, но наличие такой среды для этих волн не необходимо. Электромагнитные волны могут распространяться всюду, где может существовать электромагнитное поле, а значит, и в вакууме, т. е. в пространстве, не содержащем атомов.

К явлениям, обусловленным электромагнитными волнами, относится, например, свет. Подобно тому, как определенный диапазон частот механических колебаний воспринимается нашим ухом и дает нам ощущение звука, так определенный диапазон частот электромагнитных колебаний воспринимается нашим глазом и дает нам ощущение света.

Наблюдая распространение света, можно непосредственно убедиться, что электромагнитные волны могут распространяться в вакууме. Поставив под стеклянный колокол воздушного насоса электрический или заводной звонок, и откачивая воздух, мы обнаруживаем, что звук по мере откачки постепенно замирает и, наконец, прекращается. Видимая же глазом картина всего, что находится под колоколом и позади него, не испытывает никаких изменений. Трудно переоценить это свойство электромагнитных волн. Механические волны не выходят за пределы земной атмосферы; волны же электромагнитные открывают нам широчайшие просторы Вселенной. Световые волны позволяют нам видеть Солнце, звезды и другие небесные тела, отделенные от нас огромными «пустыми» пространствами; с помощью электромагнитных волн весьма разнообразной длины, которые доходят до нас от этих отдаленных тел, мы можем делать важнейшие заключения об устройстве Вселенной.

В 1895 г. русский физик и изобретатель Александр Степанович Попов (1859—1906) открыл новое необозримое поле применения электромагнитных волн. Он изобрел аппаратуру, позволяющую использовать эти волны для

передачи сигналов — телеграфирования без проводов. Так родилась беспроводная связь, или радио, благодаря которой получил исключительное практическое и научное значение обширный диапазон электромагнитных волн, значительно более длинных, чем световые.

Нынешнее развитие этого величайшего изобретения таково, что можно с полным основанием говорить о радио как об одном из чудес современной техники. В наши дни радио дает возможность не только осуществлять беспроводную телеграфную и телефонную связь между любыми пунктами на земном шаре, но и передавать изображения (телевидение и фототелеграфия), управлять на расстоянии машинами и снарядами (телеуправление), обнаруживать и даже видеть удаленные объекты, которые сами по себе не излучают радиоволн (радиолокация), водить по заданному курсу корабли и самолеты (радионавигация), наблюдать радиоизлучение небесных тел (радиоастрономия) и т. д.

Несмотря на различную природу механических и электромагнитных волн, существует много общих закономерностей, свойственных любым волновым явлениям. Одна из основных закономерностей такого рода состоит в том, что всякая волна распространяется из одной точки в другую не мгновенно, а с определенной скоростью.

1.5. Волновое уравнение

Выведем волновое уравнение, рассмотрев движение поперечной волны по струне.

Рассмотрим вертикальное смещение y очень короткого отрезка однородной струны. Этот участок струны, совершающий вертикальные гармонические колебания, будет простым гармоническим осциллятором. Смещение y изменяется со временем, а также зависит от x , положения той точки струны, которую мы выбираем для наблюдений за колебаниями.

Волновое уравнение будет связывать смещение y отдельного осциллятора с расстоянием x и временем t . Рассмотрим колебания только в

плоскости чертежа, так что поперечные волны на струне будут плоскополяризованными.

Масса однородной струны, приходящаяся на единицу длины, или ее линейная плотность, равна ρ . Вдоль струны существует постоянное натяжение T , хотя она обладает небольшой растяжимостью. Поэтому рассмотрим короткий отрезок и малые колебания, что уравнения могут быть линеаризованы. Действие силы тяжести не учитывается.

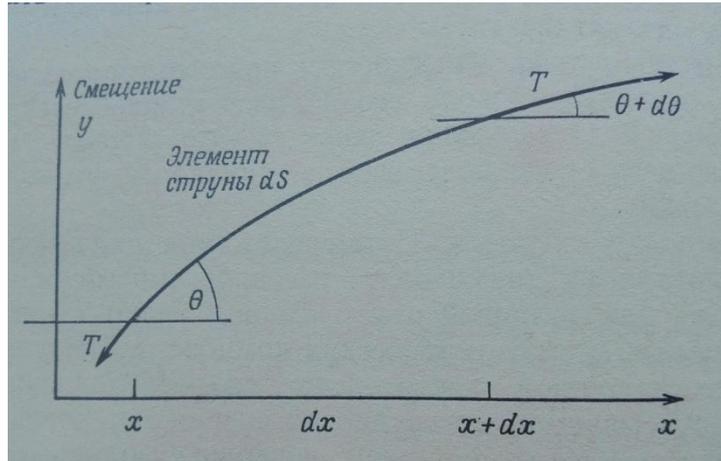


Рис. 2 Смещенный элемент струны, имеющий длину $ds \approx dx$

Как видно на рисунке 2, на искривленный элемент длиной ds с одного конца действует натяжение T , направленное под углом θ к оси x , а с другого – натяжение T , направленное под углом $\theta+d\theta$. Длина искривленного элемента равна

$$ds = \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} dx,$$

но в силу наложенных ограничений величина $\frac{\partial y}{\partial x}$ так мала, что можно пренебречь ее квадратом и принять $ds = dx$. Следовательно, масса элемента струны равна $\rho ds = \rho dx$, а уравнение его движения находится из закона Ньютона: сила равна массе, умноженной на ускорение.

Перпендикулярная сила, действующая на элемент dx в положительном направлении оси y , равна $T \sin(\theta + d\theta) - T \sin\theta$. Она равна также произведению массы ρdx на ускорение $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$. поскольку угол θ мал, то $\sin\theta \approx \text{tg}\theta = \frac{\partial y}{\partial x}$ и сила равна

$$T \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_{x+dx} - \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_x \right].$$

Здесь индексы относятся к точке, где вычисляются производные. Разность в квадратных скобках равна произведению производной функции $\frac{\partial y}{\partial x}$ на элемент расстояния dx , а поэтому сила равна

$$T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx.$$

Тогда уравнение движения малого элемента dx принимает вид

$$T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx = \rho dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2},$$

Или

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\rho}{T} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}.$$

Здесь отношение T/ρ имеет размерность квадрата скорости c^2 , а потому последнее уравнение можно переписать в виде

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}.$$

Это и есть волновое уравнение. Оно связывает ускорение гармонического осциллятора в среде с второй производной его смещения по координате x , определяющей положение осциллятора. В какой части уравнения должен быть множитель c^2 , всегда легко определить путем быстрой оценки размерности. [19].

1.6. Скорость распространения волн

В том, что распространение механических волн происходит не мгновенно, нас убеждают простейшие наблюдения. Каждый видел, как постепенно и равномерно расширяются круги на воде или как бегут морские волны. Здесь мы непосредственно видим, что распространение колебаний из одного места в другое занимает определенное время. Но и для звуковых волн, которые в обычных условиях невидимы, легко обнаруживается то же самое. Если вдали происходит гроза, выстрел, взрыв, свисток паровоза, удар

топора ит. п., то мы сначала видим эти явления и лишь спустя известное время слышим звук. Чем дальше от нас источник звука, тем больше запаздывание. Промежуток времени между вспышкой молнии и ударом грома может достигать иногда до нескольких десятков секунд. Зная расстояние от источника звука и измерив запаздывание звука, можно определить скорость его распространения. В сухом воздухе при температуре 10°C эта скорость оказалась равной 337,5 м/с. Для сравнения напомним, что современные самолеты могут развивать скорости, превышающие скорость звука в воздухе (так называемые сверхзвуковые скорости), а артиллерийские снаряды летят со скоростями 1,5 км/с и более. Скорость ракет, выводящих на орбиту искусственные спутники Земли, должна достигать значений, превышающих 8 км/с.

Одно из самых ранних измерений скорости звука в воде было выполнено также по запаздыванию звука.

В 1826 г. Колладон и Штурм произвели на Женевском озере следующий опыт. На одной лодке производилась вспышка пороха, и одновременно молоток ударял по колоколу, опущенному в воду. На другой лодке, находившейся на расстоянии 14 км от первой, измерялось время между вспышкой и появлением звука в рупоре, также опущенном в воду. Скорость звука в воде при 8°C оказалась равной 1435 м/с.

Измеряя запаздывание звука по сравнению со светом, можно получить правильное значение скорости звука, очевидно, лишь в том случае, если временем распространения света можно пренебречь. В условиях обычных наблюдений это допущение вполне приемлемо, ибо, как показывают измерения, скорость распространения световых и вообще электромагнитных волн в вакууме (а практически и в воздухе) равна приблизительно 300 000 км/с.

Вспышку, произведенную на расстоянии 3 км, мы видим с запаздыванием всего на 10 мкс (микросекунда — миллионная доля секунды), в то время как звук тратит на пробег этого расстояния около 9 с.

Скорость звуковых волн различна для разных сред и, кроме того, зависит от температуры. Современные методы позволяют производить точные измерения скорости звука, пользуясь малыми количествами исследуемого вещества. Ниже изображена таблица, показывающая скорость звука в некоторых веществах, причем указана температура, к которой относится приведенное значение скорости. Числа, приведенные в таблице, в некоторых случаях дают лишь приблизительное представление о скорости звука в материале, поскольку последняя зависит также от сорта материала (сталь, стекло) и от его очистки (керосин). [15].

Воздух	10°C	337,5 м/с
Водород	0°C	1250 м/с
Углекислый газ	0°C	258 м/с
Вода	8°C	1435 м/с
Керосин	23°C	1275 м/с
Медь	10°C	3660 м/с
Сталь	15°C	4980 м/с
Стекло	16°C	5200 м/с

Таблица 1. Скорость звука в некоторых жидкостях, газах и твердых телах

1.7. Поперечные волны

Теперь перейдем к более подробному изучению механических волн. Их свойства зависят от многих обстоятельств: от вида связи между смежными участками среды, от размеров среды (например, в теле ограниченных размеров картина распространения будет иная, чем в среде, простирающейся во все стороны практически неограниченно, как окружающий нас воздух), от формы тела и т. п.

Подвесим за один конец длинный шнур или резиновую трубку. Если нижний конец шнура быстро отвести в сторону и вернуть обратно, то изгиб «побежит» по шнуру вверх, дойдя до точки подвеса, отразится и вернется

вниз. Если двигать нижний конец шнура непрерывно, заставляя его совершать гармоническое колебание, то по шнуру «побежит» синусоидальная волна. Она тоже будет отражаться от точки подвеса.

Когда мы говорим, что волна или одиночный изгиб шнура «бежит вдоль по шнуру», то это лишь краткое описание следующего явления: каждая точка шнура совершает такое же колебание, какое мы заставили совершать нижний конец шнура, но колебание каждой точки тем больше запаздывает (отстает по фазе), чем эта точка дальше от конца шнура.

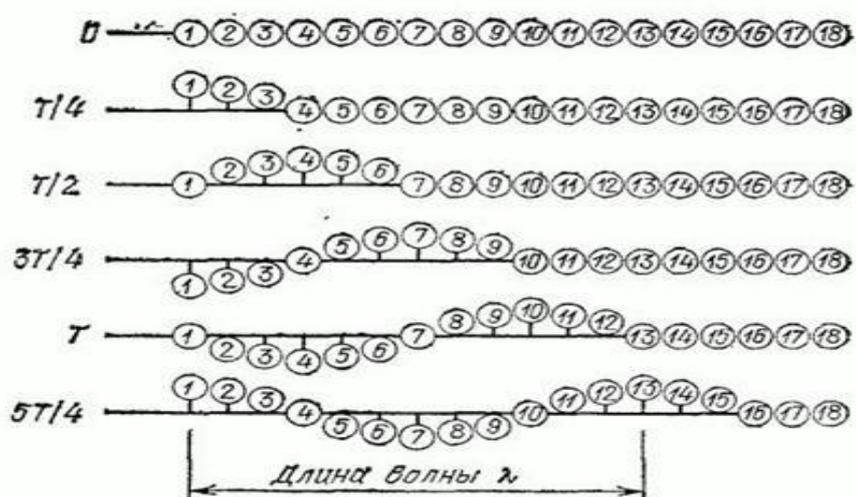


Рис. 3 Кинематика поперечной волны

Рисунок 3 поясняет кинематику процесса передачи колебаний от точки к точке. Здесь изображены последовательно различные стадии этого процесса, начиная с «положения равновесия», через каждые четверть периода. Каждый из ряда занумерованных кружков совершает гармоническое колебание около своего «положения равновесия» с одинаковой амплитудой и частотой. Колебание каждого следующего кружка отстает от колебания предшествующего на $1/12$ периода (т. е. на 30° по фазе). Таким образом, кружок 4 отстает от 1 на 90° , 7 — на 180° , 10 — на 270° , а 13 отстает на полных 360° , т. е. колеблется так же, как и 1. Далее все повторяется: кружок 14, когда до него доходит волна, колеблется так же, как и 2, 15 — как 3, и т. д. Мы видим, как волна, по которой располагаются кружки, перемещается вправо. При этом за один период колебания волна передвигается на

расстояние, равное расстоянию между кружками, колеблющимися с разностью фаз, равной 360° т. е. колеблющимися одинаково (очевидно, сдвиг фаз на число градусов, кратное 360° , равносителен отсутствию сдвига фаз).

Расстояние, на которое распространяются колебания за один период, называется длиной волны. Следовательно, длина волны — это расстояние между ближайшими точками синусоидальной (или, что, то же самое, гармонической) волны, колеблющимися в одинаковой фазе. Длину волны обозначают обычно греческой буквой λ (лямбда).

Мы имеем, таким образом, двоякого рода периодичность в волне. С одной стороны, каждая частица среды совершает периодическое колебание во времени; с другой стороны, в каждый момент времени все частицы располагаются на линии, форма которой периодически повторяется в пространстве. Длина волны λ играет по отношению к форме волны в пространстве ту же роль, какую период T играет по отношению к колебанию во времени.

Если мы захотим узнать скорость распространения волны v , т. е. расстояние, проходимое ею в единицу времени, то, очевидно, надо разделить длину волны λ (проходимую за период T) на период T ;

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

Зная две из входящих в эту формулу величин, можно вычислить третью.

Мы указали в самом начале и теперь подчеркиваем еще раз: распространение волны означает запаздывающую передачу колебательного движения от одной точки среды к другой. Никакого переноса вместе с волной самого вещества тела, в котором волна распространяется, не происходит.

Каждая точка шнура (как и каждый кружок на рисунке 3) колеблется перпендикулярно к направлению распространения волны, т. е. поперек

направления распространения. Поэтому и волна такого вида называется поперечной.

В результате чего получается передача колебательного движения от одной точки среды к другой и почему она происходит с запаздыванием? Чтобы ответить на этот вопрос, надо разобраться в динамике волны.

Смещение нижнего конца шнура в сторону вызывает деформацию шнура в этом месте. Появляются силы упругости, стремящиеся уничтожить деформацию, т. е. появляются силы натяжения, которые тянут вслед за участком шнура, смещенным рукой, непосредственно прилегающий к нему участок. Смещение этого второго участка вызывает деформацию и натяжение следующего, и т. д. (Конечно, в действительности никаких отдельных участков шнура нет и процесс идет непрерывно.) Участки шнура обладают массой, и поэтому вследствие инерции набирают или теряют скорость под действием упругих сил не мгновенно. Когда мы довели конец шнура до наибольшего отклонения вправо и начали вести его влево, смежный участок еще будет продолжать двигаться вправо и лишь с некоторым запозданием остановится и тоже пойдет влево. Таким образом, запаздывающий переход колебания от одной точки шнура к другой обусловлен наличием у материала шнура упругости и массы.

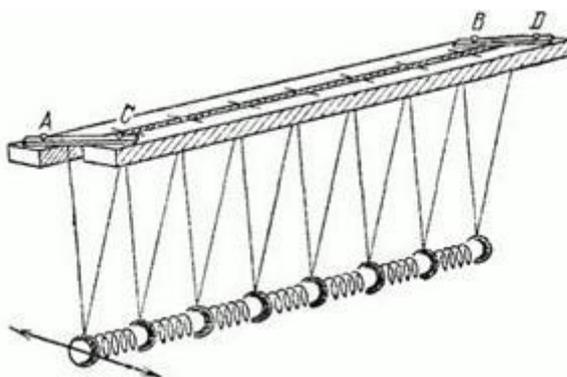


Рис. 4 Модель для демонстрации поперечных волн

Для иллюстрации действия обоих указанных свойств можно воспользоваться следующей простой моделью. Две рейки AB и CD (рис.2) подвижно соединены поперечными планками AC и BD. К рейкам подвешены

шары, причем каждый шар висит на двух нитях, верхние концы которых прикреплены соответственно к АВ и к CD. Если параллелограмм ABDC сложить так, чтобы рейки АВ и CD прилегали друг к другу (как это показано на рисунке 4), то шары смогут качаться лишь в плоскостях, перпендикулярных к рейкам. Если же сделать ABDC прямоугольником, то шары смогут качаться лишь в направлении, параллельном рейкам АВ и CD. Шары соединены между собой не слишком жесткими пружинами.

В этой модели упругого тела—цепочке чередующихся шаров и пружин — оба интересующие нас свойства разделены: масса сосредоточена в основном в шарах, а упругость — в пружинах. Взявшись за крайний шар и качая его из стороны в сторону, можно легко наблюдать, как посредством деформации пружин колебание передается от шара к шару и как колебание каждого шара отстает от колебания предыдущего. В результате возникает поперечная волна, бегущая вдоль по цепочке



Рис.5 Поперечная волна

Чем жестче пружины и чем легче шары, тем меньше отстает колебание каждого шара от колебания его предшественника, а значит, тем длиннее при одном и том же периоде получится волна. Но увеличение λ при неизменном T означает увеличение скорости распространения волны. Наша модель подсказывает нам, таким образом, следующую закономерность, которая действительно выполняется для упругих тел: скорость распространения упругих волн тем больше, чем больше жесткость тела и чем меньше его плотность.

1.8. Продольные волны

Теперь рассмотрим другие виды волн, причем опять возьмем тело удлиненной формы, а именно столб воздуха, заключенный в трубе. Вдоль трубы может двигаться поршень. Заставим этот поршень совершать гармоническое колебание. Что будет происходить в столбе воздуха?

Предыдущий пункт позволяет сразу же дать ответ. Ведь и здесь каждый участок тела (слой воздуха) обладает массой, а всякое сжатие воздуха создает избыток давления, т. е. налицо, упругость воздуха. Следовательно, в столбе воздуха образуется упругая волна, которая будет бежать от поршня. Однако теперь колебательное движение в волне происходит иначе, чем раньше: частицы воздуха колеблются в том же направлении, что и поршень, т. е. вдоль направления распространения волны. Такие волны называются продольными.

Кинематику продольной волны поясняет рис.4, где, как и на рис.1, изображен ряд пронумерованных кружков; кружки гармонически колеблются около своих положений равновесия. По-прежнему амплитуда и частота колебаний у всех кружков одинаковы, а фаза колебания каждого кружка отстает от фазы предыдущего на 30° . Отличие от рисунка 3 состоит в том, что кружки колеблются не поперек ряда, а вдоль него. Кроме того, на рисунке 6 показана уже установившаяся волна. В результате этих продольных колебаний,

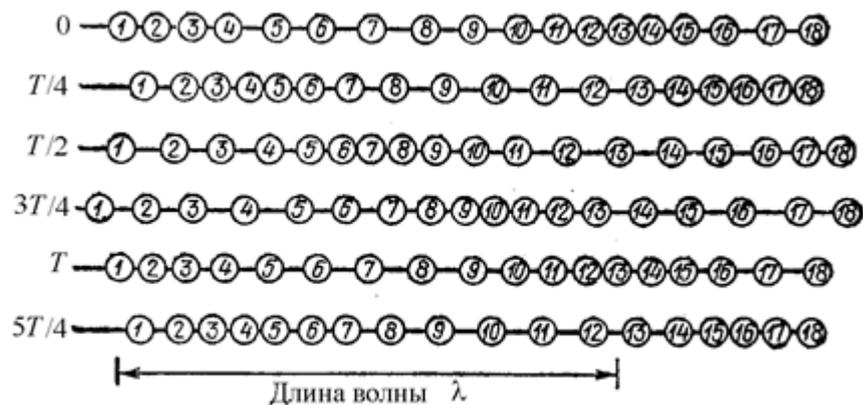


Рис. 6 Кинематика продольной волны

запаздывающих от кружка к кружку, получается бегущая направо волна, состоящая из чередующихся уплотнений и разрежений.

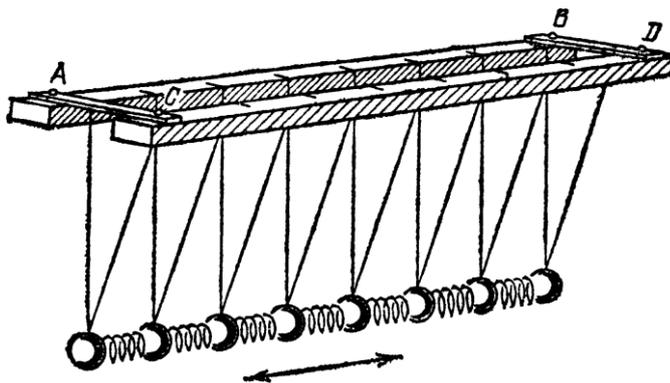


Рис.7 Модель для демонстрации продольных волн

Превратив рамку $ABDC$ в прямоугольник (рисунок 7), мы даем шарам возможность качаться лишь продольно, т. е. параллельно рейкам AB и CD . Качая крайний шар вперед и назад, мы ясно увидим, как образуются и распространяются вдоль по цепочке чередующиеся уплотнения и разрежения.

Подобно тому, как это происходит в нашей модели, продольные и поперечные волны могут распространяться и в сплошной среде, протяженной во всех направлениях. Поперечные волны в такой среде— это волны сдвига, в которых слои, перпендикулярные к направлению распространения волны, смещаются при своих колебаниях параллельно друг другу, т. е. без разрежений и уплотнений. Продольные волны — это волны сжатия (положительного и отрицательного), в которых деформация слоев среды состоит в изменении их плотности, так что волна представляет собой чередующиеся уплотнения и разрежения. Разумеется, и для продольных волн остается в полной силе определение длины волны λ , которое мы дали ранее.

Если там можно было сказать, что длина волны равна расстоянию между двумя соседними горбами синусоиды (или впадинами), то здесь она равна расстоянию между серединами двух соседних уплотнений (или разрежений). Скорость распространения продольной волны связана с длиной волны и периодом колебаний той же формулой, что и для поперечной волны. Это, конечно, не значит, что скорость распространения в среде обоих видов

волн в теле одинакова. Наоборот, во всякой среде скорость волн сжатия больше, чем волн сдвига (и, следовательно, при одном и том же периоде длина продольной волны больше чем поперечной).

Говоря «во всякой среде», надо сделать одну оговорку: во всякой твердой среде. Дело в том, что упругие поперечные волны могут распространяться только в твердых телах, в то время как продольные волны могут распространяться и в твердых телах, и в жидкостях, и в газах. Таким образом, сравнивать скорость распространения обоих видов волн можно только в твердых телах, в жидкостях же и газах возможны лишь продольные волны.

Чем это объясняется?

Как сказано, в поперечной волне происходит сдвиг слоев друг относительно друга. Но упругие силы при сдвиге возникают только в твердых телах. В жидкостях и газах смежные слои свободно скользят друг по другу, без появления противодействующих упругих сил, а раз нет упругих сил, то и образование упругих волн невозможно.

В продольной волне участки тела испытывают сжатия и растяжения, т. е. меняют свой объем. Упругие силы при изменении объема возникают как в твердых телах, так и в жидкостях и газах. Поэтому продольные волны возможны в телах, находящихся в любом из этих трех состояний.

1.9. Стоячие волны

Если в среде распространяется одновременно несколько волн, то колебания частиц среды оказываются геометрической суммой колебаний, которые совершали бы частицы при распространении каждой из волн по отдельности. Это вытекающее из опыта утверждение называется принципом суперпозиции (наложения) волн.

В случае, когда колебания, обусловленные отдельными волнами в каждой из точек среды, обладают постоянной разностью фаз, волны называются когерентными. При сложении когерентных волн возникает

явление интерференции, заключающееся в том, что колебания в одних точках усиливают, а в других точках ослабляют друг друга. Очень важный случай интерференции наблюдается при наложении двух встречных плоских волн с одинаковой амплитудой. Возникающий в результате колебательный процесс называется стоячей волной.

Стоячая волна - это волна, которая образуется при наложении двух волн с одинаковой амплитудой и частотой, когда волны движутся навстречу друг другу.

Практически стоячие волны возникают при отражении волн от преград. Падающая на преграду волна и бегущая ей навстречу отраженная волна налагаясь друг на друга, дают стоячую волну.

Напишем уравнения двух плоских волн, распространяющихся вдоль оси x в противоположных направлениях:

$$\Psi_1 = A \cos(\omega t - kx + \phi),$$

$$\Psi_2 = A \cos(\omega t + kx + \phi).$$

Сложив эти уравнения и преобразовав результат по формуле для суммы косинусов, получим:

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 = 2A \cos(kx + \frac{\phi_2 - \phi_1}{2}) \cos(\omega t + \frac{\phi_1 + \phi_2}{2})$$

Чтобы упростить это уравнение, выберем начало отсчета x так, чтобы разность $\phi_2 - \phi_1$ стала равной нулю, а начало отсчета t - так, чтобы оказалась равной нулю сумма $\phi_1 + \phi_2$. Тогда уравнение стоячей волны:

$$\Psi = 2A \cos kx \cos \omega t$$

Заменив волновое число k его значением $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, получим уравнение стоячей волны, удобное для анализа колебаний частиц в стоячей волне:

$$\Psi = \left| 2A \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \right| \cos \omega t.$$

1.10. Волны на поверхности воды

Ранее уже упоминались волны, образование которых обусловлено не силой упругости, а силой тяжести. Именно поэтому нас не должно удивлять, что волны, распространяющиеся по поверхности жидкости, не являются продольными. Однако они не являются и поперечными, движение частиц жидкости здесь более сложное.

Если в какой-либо точке поверхность жидкости опустилась (например, в результате прикосновения твердым предметом), то под действием силы тяжести жидкость начнет сбегать вниз, заполняя центральную ямку и образуя вокруг нее кольцевое углубление. На внешнем крае этого углубления все время продолжается сбегание частиц жидкости вниз, и диаметр кольца растет. Но на внутреннем крае кольца частицы жидкости вновь «выныривают» наверх, так что образуется кольцевой гребень. Позади него опять получается впадина, и т. д. При опускании вниз частицы жидкости движутся, кроме того, назад, а при подъеме наверх они движутся и вперед. Таким образом, каждая частица не просто колеблется в поперечном (вертикальном) или продольном (горизонтальном) направлении, а, как оказывается, описывает окружность.

На рис.6 темными кружками показано положение частиц поверхности жидкости в некоторый момент, а светлыми кружками — положение этих частиц немного времени спустя, когда каждая из них прошла часть своей круговой траектории. Эти траектории показаны штриховыми линиями, пройденные участки траекторий — стрелками. Линия, соединяющая темные кружки дает нам профиль волны. В изображенном на рисунке случае большой амплитуды (т. е. радиус круговых траекторий частиц не мал по сравнению с длиной волны) профиль волны совсем не похож на синусоиду: у него широкие впадины и узкие гребни. Линия, соединяющая светлые кружки, имеет ту же форму, но сдвинута вправо (в сторону запаздывания фазы), т. е. в результате движения частиц жидкости по круговым траекториям волна переместилась. [7].



Рис.8 Движение частиц жидкости в волне на ее поверхности

Следует заметить, что в образовании поверхностных волн играет роль не только сила тяжести, но и сила поверхностного натяжения, которая, как и сила тяжести, стремится выровнять поверхность жидкости. При прохождении волны в каждой точке поверхности жидкости происходит деформация этой поверхности — выпуклость становится плоской и затем сменяется вогнутостью, и обратно, в связи с чем меняется площадь поверхности и, следовательно, энергия поверхностного натяжения. Нетрудно понять, что роль поверхностного натяжения будет при данной амплитуде волны тем больше, чем больше искривлена поверхность, т. е. чем короче длина волны. Поэтому для длинных волн (низких частот) основной является сила тяжести, но для достаточно коротких волн (высоких частот) на первый план выступает сила поверхностного натяжения. Граница между «длинными» и «короткими» волнами, конечно, не является резкой и зависит от плотности жидкости и свойственного ей поверхностного натяжения. У воды эта граница соответствует волнам, длина которых около 1 см, т. е. для более коротких волн (называемых капиллярными волнами) преобладают силы поверхностного натяжения, а для более длинных — сила тяжести.

Несмотря на сложный «продольно-поперечный» характер поверхностных волн, они подчиняются закономерностям, общим для всякого волнового процесса, и очень удобны для наблюдения многих таких закономерностей.[24]. Поэтому рассмотрим несколько подробнее на способе их получения и наблюдения.

Для опытов с такими волнами можно взять неглубокую ванну, дном которой служит стекло, площадь которого около 1 м². Под стеклом на расстоянии 1—1,5 м можно поместить яркую лампочку, позволяющую спроецировать этот «пруд» на потолок или экран. На тени в увеличенном

виде можно наблюдать все явления, происходящие на поверхности воды. Для ослабления отражения волн от бортов ванны поверхность последних делается рифленой и сами борта — наклонными.

Наполним ванну водой примерно на глубину 1 см и коснемся поверхности воды концом проволоки или острием карандаша. Мы увидим, как от точки прикосновения разбегается кольцевая морщинка. Скорость ее распространения невелика (10—30 см/с), поэтому можно легко следить за ее перемещением.

Укрепим проволоку на упругой пластинке и заставим ее колебаться, причем так, чтобы при каждом колебании пластинки конец проволоки ударял по поверхности воды. По воде побежит система кольцевых гребней и впадин (рисунок 9). Расстояние между соседними гребнями или впадинами λ , т. е. длина волны, связано с периодом ударов T уже рассмотренной ранее формулой $\lambda = v * T$.

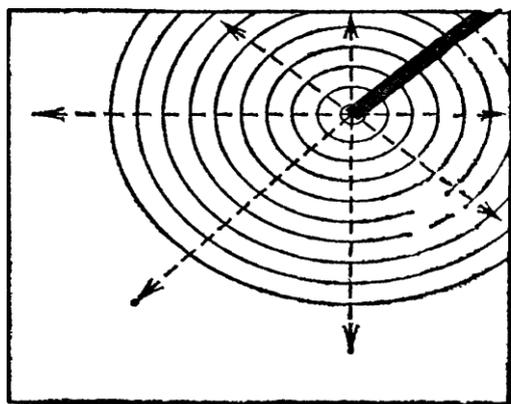


Рис.9 Кольцевые волны

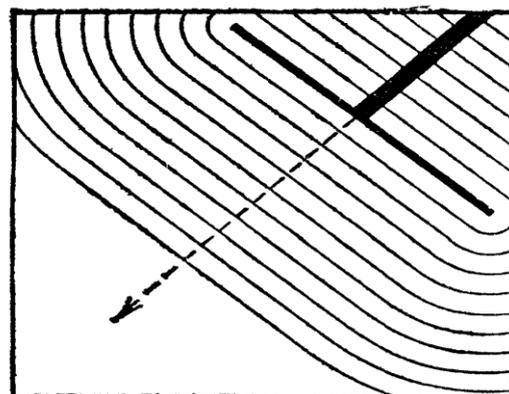


Рис.10 Прямолинейные волны

Линии, перпендикулярные к гребням и впадинам, показывают направления распространения волны. У кольцевой волны направления распространения изображаются, очевидно, прямыми линиями, расходящимися из центра волны, как это показано на рисунке 9 штриховыми стрелками.

Заменяя конец проволоки ребром линейки, параллельным поверхности воды, можно создать волну, имеющую форму не концентрических колец, а параллельных друг другу прямолинейных гребней и впадин (рисунок 10). В

этом случае перед средней частью линейки мы имеем одно единственное направление распространения.

Кольцевые и прямолинейные волны на поверхности дают представление о сферических и плоских волнах в пространстве. Небольшой источник звука, излучающий равномерно во все стороны, создает вокруг себя сферическую волну, в которой сжатия и разрежения воздуха расположены в виде концентрических шаровых слоев. Участок сферической волны, малый по сравнению с расстоянием до ее источника, можно приближенно считать плоским. Это относится, конечно, к волнам любой физической природы — и к механическим, и к электромагнитным. Так, например, любой участок (в пределах земной поверхности) световых волн, приходящих от звезд, можно рассматривать как плоскую волну.

Волны на поверхности воды делают очень наглядными и удобными для наблюдения основные черты многих волновых явлений, включая и такие важные явления, как дифракция и интерференция. Волны используются в водяной ванне для получения ряда общих представлений, сохраняющих значение и для упругих (в частности, акустических), и для электромагнитных волн.

1.11. Уравнение волны на поверхности воды

Наиболее важный пример - волны на свободной поверхности водоёма (океана, моря, озера и др.), формирующиеся благодаря действию сил тяжести и поверхностного натяжения. Если внешнее воздействие (брошенный камень, движение судна, порыв ветра и т. п.) нарушает равновесие жидкости, то указанные силы, стремясь восстановить равновесие, создают движения, передаваемые от одних частиц жидкости к другим, порождая волны. При этом волновые движения охватывают, строго говоря, всю толщу воды, но если глубина водоёма велика по сравнению с длиной волны, то эти движения сосредоточены главным образом в приповерхностном слое, практически не достигая дна (короткие волны, или волны на глубокой воде). Простейший

вид таких волн - плоская синусоидальная волна, в которой поверхность жидкости синусоидально "гофрирована" в одном направлении, а все возмущения физических величин, направлены вертикально смещения частиц $\xi(z, x, t)$, имеют вид:

$$\xi = A(z) \cos(\omega t - kx),$$

где x – горизонтальная, z – вертикальная координаты, ω – угловая частота, k – волновое число, A - амплитуда колебаний частиц, зависящая от глубины z . Решение уравнений гидродинамики несжимаемой жидкости вместе с граничными условиями (постоянное давление на поверхности и отсутствие возмущений на большой глубине) показывает, что

$$A(z) = A_0 e^{-kz},$$

Где A_0 – амплитуда смещения поверхности. При этом каждая частица жидкости движется по окружности, радиус которой равен $A(z)$. Колебания затухают в глубь жидкости по экспоненте, и тем быстрее, чем короче волна (больше k). Величины ω и k связаны дисперсионным уравнением

$$\omega = \sqrt{gk + \frac{\sigma k^3}{\rho}}, \quad (1)$$

Где ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения, σ – коэффициент поверхностного натяжения. Из этой формулы определяются фазовая скорость $v_\phi = \omega/k$, с которой движется точка с фиксированной фазой (например, вершина волны), и групповая скорость $v_{гр} = d\omega/dk$ - скорость движения энергии. Обе эти скорости в зависимости от k (или длины волны $\lambda = 2\pi/k$) имеют минимум; так минимальное значение фазовой скорости волн на чистой воде достигается при $\lambda \approx 1,7$ см и равно 23 см/с. Волны гораздо меньшей длины называются капиллярными, а более длинные – гравитационными, т.к. на их распространение преимущественное влияние оказывают соответственно силы поверхностного натяжения и тяжести. Для чисто гравитационных волн $v_\phi = 2v_{гр} = g/\omega$. В смешанном случае говорят о гравитационно-капиллярных волнах.

В общем случае на характеристики волн влияет полная глубина жидкости H . Если вертикальные смещения жидкости у дна равны нулю (жёсткое дно), то в плоской синусоидальной волне амплитуда колебаний меняется по закону:

$$A_0 \operatorname{sh}k(H - z) / \operatorname{sh}kH,$$

а дисперсионное уравнение волн в водоёме конечной глубины (без учёта вращения Земли) имеет вид:

$$\omega = \sqrt{\left(gk + \frac{\sigma k^2}{\rho}\right) \operatorname{th}kH}. \quad (2)$$

Для коротких волн ($kH \gg 1$) это уравнение совпадает с (1). Для длинных волн, или волн на мелкой воде ($kH \ll 1$), если можно пренебречь эффектами капиллярности (для длинных волн они обычно существенны только в случае тонких пленок жидкости), оно приобретает вид $\omega = \sqrt{gH}$. В такой волне фазовая и групповая скорости равны одной и той же величине $u = \sqrt{gH}$, не зависящей от частоты. Это значение скорости наибольшее для гравитационных волн в данном водоёме; в самом глубоком месте океана ($H=11$ км) оно ≈ 330 м/с. [5]. Движение частиц в длинной волне происходит по эллипсам, сильно вытянутым в горизонтальном направлении, причём амплитуда горизонтальных движений частиц почти одинакова по всей глубине.

1.12. Электромагнитные волны

Электромагнитные волны возникают вследствие связи между изменениями электрического и магнитного полей. Всякое изменение напряженности электрического поля в какой-нибудь точке пространства вызывает в смежных точках появление переменного магнитного поля, изменение которого в свою очередь порождает меняющееся электрическое поле. Именно поэтому происходит передача колебаний электрического и

магнитного поля из одной точки пространства в соседние, т. е. происходит распространение электромагнитной волны.

Известно, что электрическое поле создается электрически заряженными телами, а магнитное поле окружает проводники, по которым течет электрический ток (т. е. происходит перемещение электрических зарядов). Если электрические заряды неподвижны, то и создаваемое ими электрическое поле остается все время одним и тем же, не меняется. Если заряды движутся (например, в металлической проволоке) равномерно, то мы имеем постоянный ток, создающий постоянное же, не изменяющееся магнитное поле. Таким образом, в обоих случаях электрическое и магнитное поля неизменны, а значит, и электромагнитная волна возникнуть не может.

Но при неравномерном движении электрических зарядов, в частности при всяком их колебании, а значит, и при всяком переменном токе электрическое и магнитное поля будут меняться с течением времени; эти изменения передаются от точки к точке и, следовательно, распространяются во все стороны, образуя электромагнитную волну.

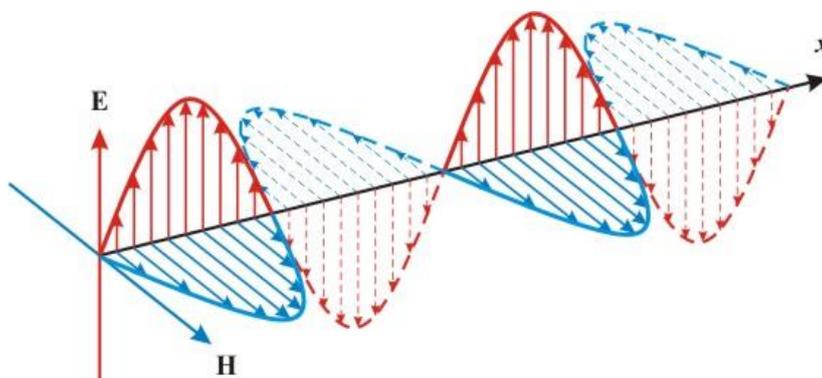


Рис. 11 Электромагнитная волна

Казалось бы, что получить электромагнитную волну весьма просто. Можно, например, заставить заряженное тело совершать колебательное движение или пропустить городской переменный ток через проволочную катушку. Так как в первом случае будет меняться электрическое поле, а во втором — магнитное, то, согласно сказанному, должна будет возникнуть электромагнитная волна. Однако практически при такой постановке опыта мы не получим доступных наблюдению волновых явлений.

В чем же причина этого неуспеха?

Для того чтобы ответить на этот вопрос, необходимо более внимательно рассмотреть, как возникают электромагнитные волны, и выяснить, при каких условиях они хорошо излучаются.

Как уже было сказано, в электромагнитной волне проявляется взаимная связь электрического и магнитного полей: изменение одного из них вызывает появление другого.

Возникновение электрического поля в результате изменения магнитного есть не что иное, как явление электромагнитной индукции, открытое на опыте М. Фарадеем в 1831 г. (см. том II, гл. XV). Обратное же явление — возникновение магнитного поля при всяком изменении электрического — было теоретически предсказано английским физиком Джеймсом Клерком Максвеллом (1831— 1879). Исходя из предположения о существовании такого явления, Максвелл и пришел к выводу о необходимости возникновения электромагнитных волн при всяком изменении электромагнитного поля. [15].

Теоретическое предположение Максвелла требовало проверки на опыте. Если опыт докажет существование таких электромагнитных волн, то этим будет подкреплён весь ход теоретических рассуждений Максвелла, включая и его предположение о возникновении магнитного поля при изменении поля электрического. Для успеха опытной проверки теории очень важно, чтобы наблюдаемые явления были достаточно интенсивными.

Согласно теории Максвелла индукция магнитного поля, возникающего при изменении электрического поля, тем больше, чем быстрее происходят изменения электрического поля. Положение здесь такое же, как и в явлении электромагнитной индукции, где напряженность электрического поля, возникающего при изменении магнитного поля, тем больше, чем быстрее меняется магнитное поле.

Таким образом, необходимым условием образования интенсивных электромагнитных волн является достаточно высокая частота электрических

колебаний. Для успеха опытов низкая частота городского тока (50 Гц) совершенно недостаточна. Необходимы гораздо более высокие частоты электрических колебаний.

Такие частоты, достигающие до десятков мегагерц и более, осуществляются, как известно, при колебаниях в электрических контурах. Однако и в опытах с такими контурами обнаружить электромагнитные волны было бы очень нелегко.

Дело в том, что высокая частота электрических колебаний в какой-либо цепи, будучи необходимым условием для получения сильных электромагнитных полей, еще не является достаточным условием для хорошего излучения электромагнитных волн этой цепью.

Причина заключается в том, что колебательный контур представляет собой почти замкнутую цепь, размеры которой малы по сравнению с длиной волны, соответствующей частоте колебаний контура. В такой цепи для каждого ее участка с одним направлением тока или знаком заряда можно подыскать другой близкий участок, в котором в тот же момент времени направление тока или знак заряда противоположны. Возьмем, например, один из витков катушки индуктивности (рис. 10).

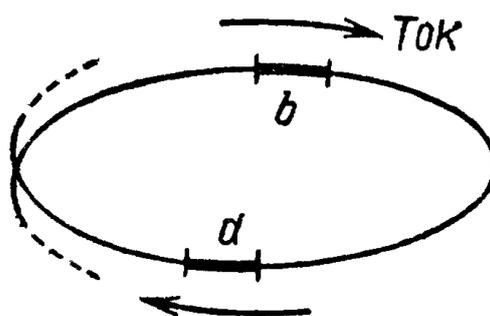


Рис. 12 Виток катушки индуктивности

В любых диаметрально противоположных участках а и б витка во всякий момент времени токи направлены противоположно друг другу. Следовательно, на больших расстояниях от витка участки а и б действуют как два близких противофазных излучателя. Волны, излученные этими двумя участками, всюду ослабляют друг друга подобно излучению двух ножек камертона. Так как весь виток состоит из таких пар противофазных

излучателей, то и виток в целом излучает плохо, а значит, плохо излучает и вся катушка.

Аналогично обстоит дело и с конденсатором контура: в любой момент времени заряды обкладок равны по модулю и противоположны по знаку, причем эти разноименные заряды удалены друг от друга гораздо меньше, чем на полволны.

Из сказанного ясно, какой должна быть электрическая цепь, чтобы она могла хорошо излучать: необходимо перейти к незамкнутой (открытой) цепи, в которой либо нет участков с противофазными колебаниями, либо же расстояние между ними не мало по сравнению с λ .

Электромагнитные волны являются поперечными, поскольку скорость \vec{v} распространения волны, напряженность \vec{E} электрического поля и индукция \vec{B} магнитного поля волны взаимно перпендикулярны.

1.13. Волновое уравнение для электромагнитных волн

Любой колебательный контур излучает энергию. Изменяющееся электрическое поле возбуждает в окружающем пространстве переменное магнитное поле, и наоборот. Математические уравнения, описывающие связь магнитного и электрического полей, были выведены Максвеллом и носят его имя. Запишем уравнения Максвелла в дифференциальной форме для случая, когда отсутствуют электрические заряды ($\rho = 0$) и токи ($j = 0$):

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{E} &= 0; & \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \\ \operatorname{div} \vec{H} &= 0; & \operatorname{rot} \vec{H} &= \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}; \\ \vec{B} &= \mu \mu_0 \vec{H}. \end{aligned}$$

Величины μ_0 и ε_0 — электрическая и магнитная постоянные, соответственно, которые связаны со скоростью света в вакууме соотношением

$$\varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}.$$

Постоянные μ и ε характеризуют электрические и магнитные свойства среды, которую мы будем считать однородной и изотропной.

В отсутствие зарядов и токов невозможно существование статических электрического и магнитного полей. Однако переменное электрическое поле возбуждает магнитное поле, и наоборот, переменное магнитное поле создает электрическое поле. Поэтому имеются решения уравнений Максвелла в вакууме, в отсутствие зарядов и токов, где электрические и магнитные поля оказываются неразрывно связанными друг с другом. В теории Максвелла впервые были объединены два фундаментальных взаимодействия, ранее считавшихся независимыми. Поэтому мы говорим теперь об электромагнитном поле.

Колебательный процесс в контуре сопровождается изменением окружающего его поля. Изменения, происходящие в окружающем пространстве, распространяются от точки к точке с определенной скоростью, то есть колебательный контур излучает в окружающее его пространство энергию электромагнитного поля.

При строго гармоническом изменении во времени векторов \vec{E} и \vec{H} электромагнитная волна называется монохроматической.

Получим из уравнений Максвелла волновые уравнения для векторов \vec{E} и \vec{H} .

Ротор (*rot*) и дивергенция (*div*) — это некоторые операции дифференцирования, производимые по определенным правилам над векторами.

Возьмем ротор от обеих частей уравнения

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.$$

При этом воспользуемся доказываемой в курсе математики формулой:

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} \equiv \operatorname{grad}(\operatorname{div} \vec{E}) - \Delta \vec{E},$$

где Δ — введенный выше лапласиан. Первое слагаемое в правой части равно нулю в силу другого уравнения Максвелла:

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0.$$

Получаем в итоге:

$$-\Delta \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \operatorname{rot} \vec{B}.$$

Выразим $\operatorname{rot} B$ через электрическое поле с помощью уравнения Максвелла:

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu \mu_0 \operatorname{rot} \vec{H} = \mu \mu_0 \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \mu \varepsilon \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

В результате приходим к уравнению:

$$\Delta \vec{E} = \varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}.$$

Учитывая связь

$$\varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$$

и вводя показатель преломления среды

$$n = \sqrt{\varepsilon \mu},$$

запишем уравнение для вектора напряженности электрического поля в виде:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}.$$

Убеждаемся, что мы получили волновое уравнение, где v — фазовая скорость света в среде:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}.$$

1.14. Поляризация электромагнитных волн

В любой электромагнитной волне векторы напряженности электрического поля E , индукции магнитного поля B и вектор скорости волны v образуют взаимно перпендикулярную тройку векторов.

Поскольку при распространении волны вектора B и E всегда взаимно перпендикулярны, то они изменяются в пространстве одинаковым образом, описывая одинаковые по форме кривые, но во взаимно перпендикулярных плоскостях. Поэтому достаточно знать, как изменяется в пространстве один из этих векторов, а поведение другого будет аналогичным. Специальными опытами установлено, что действие электромагнитной волны на глаз, фотоприемники и многие другие объекты оказывает электрический вектор E волны, который поэтому называют также световым вектором волны. Вид поляризации волны определяется видом той кривой, которую описывает электрический вектор E волны за один период колебания в плоскости наблюдения. При этом свет должен распространяться к наблюдателю. Плоскость наблюдения – это плоскость, перпендикулярная направлению распространения волны. Ясно, что магнитный вектор B волны описывает такую же по форме кривую, что и вектор E .

Поляризация электромагнитных волн имеет три вида: линейная (плоская), круговая (циркулярная), эллиптическая.

Линейная (плоская) поляризация: - в процессе распространения волны вектор E колеблется все время в одной и той же пространственной плоскости, которую называют плоскостью колебаний вектора E (иногда также плоскостью поляризации волны). Проекция вектора E на плоскость наблюдения в этом случае будет иметь вид отрезка прямой линии, в связи с чем эту поляризацию и называют линейной или же плоской. Отметим, что плоскость колебания магнитного вектора волны будет перпендикулярна плоскости колебаний вектора E .

Электромагнитная волна с линейной поляризацией - это частный случай. В общем случае положение плоскости поляризации изменяется в

течение периода. Для понимания этого рассмотрим волновой процесс, который является суммой двух плоских линейно поляризованных волн одинаковой частоты. Вектор напряженности электрического поля первой волны направим вдоль оси x , а второй – вдоль оси y . Следовательно, плоскость поляризации первой волны xz , а второй - yz .

Для того, чтобы определить поляризацию получившейся волны необходимо записать формулы, описывающие складываемые волны. В фиксированной точке пространства имеем:

$$E_x = E_1 \cos(\omega t + \alpha),$$

$$E_y = E_2 \cos(\omega t + \beta).$$

Где E_1 – амплитуда волны, вектор напряженности электрического поля которой направлен по оси x , α – фаза этой волны, E_2 – амплитуда волны, вектор напряженности электрического поля которой направлен по оси y , β – фаза этой волны.

Эти волны необходимо сложить. Для упрощения задачи положим, что волны синфазны, то есть $\alpha = \beta$. В результате получим:

$$E = E_x + E_y = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \cos(\omega t + \alpha).$$

Таким образом, в результате сложения двух линейно поляризованных синфазных волн мы получили новую линейно поляризованную волну. Ориентация вектора напряженности электрического поля суммарной волны постоянна, а в течение периода изменяется только его амплитуда.

Эллиптическая поляризация: - при этой поляризации вектор E волны за один период волны тоже делает полный оборот вокруг направления распространения волны, но длина вектора E при этом изменяется таким образом, что конец его описывает в плоскости наблюдения эллипс. Если вектор E вращается по часовой стрелке, то поляризация называется правой, а если против – левой эллиптической.

Рассмотрим сложение двух волн, сдвинутых по фазе. Величина сдвига фаз принципиального значения не имеет, поэтому для простоты положим его

равным $\pi/2$. Это позволяет описать слагаемые волны следующими формулами:

$$E_x = E_1 \cos \omega t,$$

$$E_y = E_2 \sin \omega t.$$

При записи этих формул начальная фаза опущена, так как она не имеет значения, важен только сдвиг. Сдвиг фазы на $\pi/2$ учтен тем, что зависимость от времени напряженности поля второй волны описывается не косинусом, а синусом.

В данном случае конец вектора напряженности электрического поля за период будет описывать некоторую кривую. Найдем ее уравнение. Для этого правую и левую части формулы разделим на E_1 , а правую и левую части формулы – на E_2 . Получим:

$$\frac{E_x}{E_1} = \cos \omega t,$$

$$\frac{E_y}{E_2} = \sin \omega t.$$

Далее возведем оба равенства в квадрат и сложим. Получим:

$$\left(\frac{E_x}{E_1} \right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_2} \right)^2 = 1.$$

Это - уравнение эллипса. Он изображен на рисунке 13. Эллипс лежит в плоскости x и y и вписан в прямоугольник со сторонами $2E_1$ и $2E_2$. Получилось, что за период конец суммарного вектора напряженности электрического поля описывает эллипс.

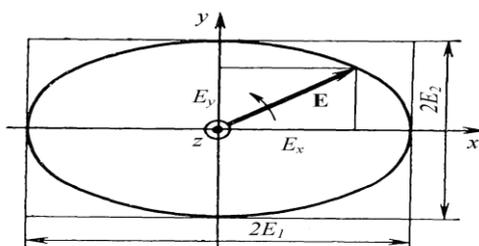


Рис.13 Эллипс поляризации

Круговая (циркулярная) поляризация: - при такой поляризации вектор E волны за один период волны делает полный оборот вокруг направления распространения волны, при этом его длина остается постоянной. В плоскости наблюдения проекция вектора E описывает круг, что и определяет название такой поляризации. Если вектор вращается по часовой стрелке (волна должна распространяться к наблюдателю), то поляризация называется правой круговой, а если против часовой стрелки – то левой круговой поляризацией.

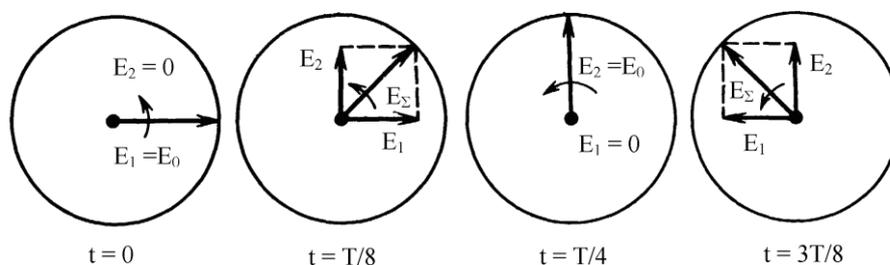


Рис.14 Сложение двух линейно поляризованных волн в волну с круговой поляризацией.

Пример сложения двух линейно поляризованных волн в волну с круговой поляризацией иллюстрирует рисунок 14.

Обе складываемые волны имеют одинаковые амплитуды E_0 , но сдвинуты по фазе на 90° . Мгновенное значение напряженности поля первой волны, ориентированной по горизонтали, обозначено E_1 , а второй волны, ориентированной по вертикали - E_2 . Зависимости напряженности поля этих волн от времени описываются формулами соответственно.

Левая картинка соответствует моменту времени $t=0$. В этот момент времени напряженность поля первой волны максимальна и равна E_0 . Напряженность поля второй волны равна нулю. Следовательно, вектор суммы направлен горизонтально и равен E_0 .

Следующая картинка иллюстрирует положение векторов через $1/8$ периода. Фаза волны при этом $\omega t = \pi/4$, $\cos(\pi/4) = \sin(\pi/4) = 0.707$. Следовательно, $E_1 = E_2 = 0.707E_0$. Модуль суммарного вектора равен корню квадратному из

суммы квадратов амплитуд составляющих. Поэтому модуль не изменится, но вектор повернется в пространстве против часовой стрелки на угол 45° относительно начального положения.

На третьей картинке, при $t = T/4$, $E_2 = E_0$, а $E_1 = 0$. Модуль суммарного вектора остался прежним, но он повернулся еще на 45° относительно начального положения.

И так далее. Очевидно, что модуль суммарного вектора постоянен и равен E_0 , а вектор вращается вокруг направления распространения.

Коэффициент эллиптичности этой волны равен единице. Мгновенный снимок электрического поля волны с круговой поляризацией приведен на рисунке 15. Важно понять, что вектор напряженности электрического поля в эллиптически поляризованной волне вращается вокруг направления распространения. При этом плоскость поляризации тоже вращается. За период они описывают полный оборот.

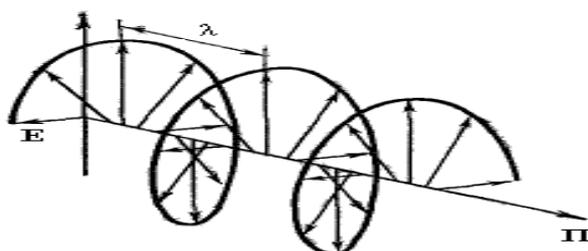


Рис.15 Мгновенный снимок волны с круговой поляризацией

Таким же путем можно получить и волну с эллиптической поляризацией. Для этого можно сохранить сдвиг фаз между слагаемыми равным $\pi/2$, но изменить амплитуду одной из волн, или складывать волны равной амплитуды, но со сдвигом фазы, меньшим, чем $\pi/2$.

Волна с круговой поляризацией была получена путем сложения двух линейно поляризованных волн. В свою очередь, линейно поляризованную волну можно рассматривать как сумму двух волн с эллиптической или круговой поляризацией, вращающихся в разные стороны. Процедуру сложения таких волн с равными амплитудами и начальными фазами иллюстрирует рисунок 16.

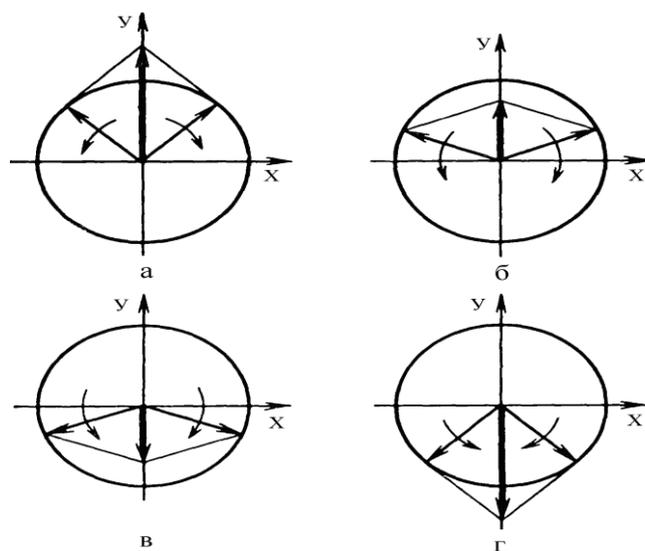


Рис.16 Сложение двух волн с круговой поляризацией

Векторы напряженности электрического поля складываемых волн изображены тонкими линиями, а вектор суммарной волны – более толстой. Из построения видно, что результирующая волна оказывается линейно поляризованной. Плоскость ее поляризации на рисунке 16 ориентирована вертикально, а амплитуда в два раза превышает амплитуду слагаемых волн.

Поляризация волны имеет большое значение для практической радиотехники. Для примера рассмотрим штыревую антенну. Это прямой отрезок металлического стержня, в котором электрическое поле создает ток проводимости. Электрическое поле действует на свободные электроны металла и заставляет их двигаться. В антенне возникает ток, который используется для выделения сигнала. Как видите, все просто. За исключением одного. Для получения максимального напряжения сигнала на выходе антенны ось стержня должна быть ориентирована параллельно вектору напряженности электрического поля. Или, что то же самое, параллельно плоскости поляризации. Если ось антенны будет направлена под углом к вектору напряженности электрического поля, уровень сигнала уменьшится. А если антенну направить перпендикулярно плоскости поляризации, то сигнала на выходе не будет вовсе.

С другой стороны, такая же штыревая антенна в поле волны с круговой поляризацией, размещенная перпендикулярно направлению

распространения, будет создавать выходной сигнал неизменной амплитуды независимо от ориентации в поперечной плоскости. Это обстоятельство делает волны с круговой поляризацией предпочтительными для организации радиосвязи с подвижными объектами, антенны которых могут занимать любые, заранее не предсказуемые положения.

Любой вид поляризации электромагнитных волн можно перевести в другой с помощью специальных поляризованных приборов.

1.15. Гравитационные волны

Есть еще один тип волн – гравитационные волны, являющиеся аналогом электромагнитных.

Гравитационные волны, как и электромагнитные, представляют собой возмущения гравитационного поля, распространяющиеся со световой скоростью. В отличие от электромагнитных волн, которые возникают при колебаниях дипольных систем, гравитационные волны связаны с колебаниями квадрупольных систем. Частным примером такой квадрупольной системы является эллипсоид с разными по величине полуосями. Или еще проще — система из четырех тел (шариков), не лежащих в одной плоскости.

Кроме того, в отличие от электромагнитной волны, которая имеет одну плоскость поляризации, связанную с колебаниями вектора напряженности электрического поля, гравитационные волны обладают двумя плоскостями поляризации (взаимно перпендикулярными). Если при прохождении электромагнитной волны через среду с электрическими зарядами эти заряды раскачиваются в одной плоскости (линейно поляризованная волна), то прохождение гравитационной волны через материальную среду приводит к деформациям в перпендикулярных плоскостях. Другими словами, если на пути гравитационной волны оказывается шар (из какого-либо материала), то гравитационная волна деформирует его в эллипсоид через каждые четверть периода в перпендикулярных плоскостях.

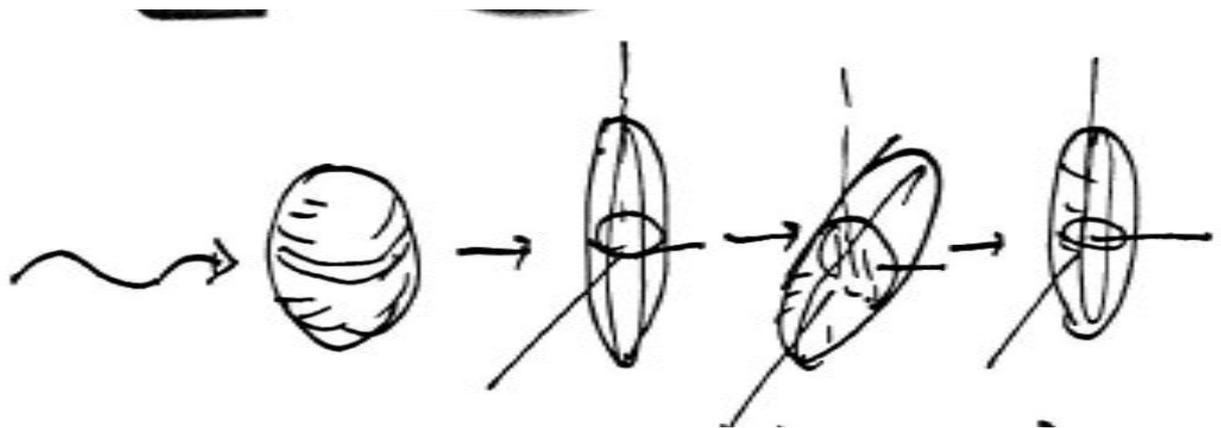


Рис. 17 Шар на пути гравитационной волны

Это означает, что по таким механическим деформациям, на которые реагируют пьезодатчики, можно обнаружить эти волны. Это и произошло в 2016 г. Только вместо пьезодатчиков был использован лазерный интерферометр, который значительно чувствительней пьезодатчиков.

Если же говорить об описании гравитационной волны, то следует отметить, что в современной теории гравитации она описывается метрическим тензором, являющимся аналогом напряженностей электромагнитного поля. Этот метрический тензор удовлетворяет тензорному волновому уравнению, являющегося уравнениями Эйнштейна для гравитационной волны.

Глава II Анализ особенностей описания волновых явлений

С колебаниями и волнами мы сталкиваемся на каждом шагу, как в повседневной жизни, так и при более глубоком изучении физики явлений. Однако нет возможности исчерпывающим образом определить, что следует называть колебательным или волновым процессом вообще. Любая попытка ограничить класс рассматриваемых явлений типом уравнения или перечислением каких-либо общих физических свойств обычно приводит к неудаче, так как всегда удастся построить пример, не укладывающийся в принятую схему. Поэтому, приступая к изучению широкого круга столь разнообразных задач, разумно опереться на интуитивные представления и ограничиться вначале весьма общими утверждениями.

Выше были рассмотрены наиболее характерные свойства волновых процессов на примере нескольких типов волн различной природы, но это не означает, что рассматриваемые свойства присущи всем волновым процессам без исключения.

В окружающем нас мире происходит множество явлений, проявляющих черты колебательных и волновых процессов. Представление о них имеется у каждого человека, наблюдавшего движение маятника или волны, бегущие на поверхности воды. Курс общей физики дополняет наше представление другими конкретными примерами. Несмотря на многообразие ситуаций и различие в способах описания, можно выделить много общего в протекании процессов различной физической природы.

Колебаниями называют ограниченные и чаще всего повторяющиеся движения в окрестности некоторого среднего положения (например, устойчивое положение равновесия). О колебательном процессе можно говорить в случаях, когда состояние реальной системы допустимо описывать идеализированным способом: конечным набором параметров, изменяющихся во времени. Для математического маятника, например, таким параметром будет угол отклонения нити от вертикали; для связанных колебательных контуров параметров уже два (напряжения или токи в первом и втором

контуре) и т.д. Колебательные процессы описываются одним или несколькими обыкновенными дифференциальными уравнениями.

Волна – это распространение колебаний в пространстве, происходящее с конечной скоростью. Волновой процесс – более сложная модель движения реальных систем, состояние которых зависит уже не только от времени, но и от пространственных переменных. Поэтому такие процессы описываются уравнениями, содержащими частные производные.

Критерием перехода от колебательного движения к волновому движению может служить «условие квазистационарности»: если характерные размеры системы $L < cT$ (c – скорость распространения возмущения, T – время его заметного изменения), о процессе можно говорить как о колебательном в системе с сосредоточенными параметрами. В случае $L > cT$ процесс нужно считать волновым, а систему – распределенной.

Волны обычно служат наиболее быстрым механизмом переноса энергии, позволяющим осуществить в системе переход от неравновесного состояния к равновесному состоянию. При этом не происходит существенного перемещения вещества, хотя такое перемещение иногда возможно как побочное явление, сопровождающее распространение волны.

Волновой процесс – это одна из важнейших форм движения материи; в той или иной мере волновые движения присущи всем без исключения объектам материального мира. Как показали эксперименты по дифракции и рассеянию микрочастиц, корпускулярно – волновой дуализм есть фундаментальное свойство материи вообще, и для описания состояния квантовых систем необходимо пользоваться волновыми функциями.

Волновые процессы – нелинейные и линейные – в настоящее время интенсивно изучаются в различных областях физики: электродинамике, физике плазм, оптике, радиофизике, акустике, гидродинамике и т.д. Механизмы распространения возмущений, естественно, сильно отличаются друг от друга. Например, упругие волны в жидкостях и газах существуют вследствие того, что коллективное движение частиц среды создает

чередующиеся сжатия и разряжения, которые вызывают движение в следующем слое жидкости (газа). Возмущение передается от слоя к слою преимущественно в направлении, вдоль которого происходят колебания частиц, т.е. волны в жидкостях и газах являются продольными. Твердые тела обладают сдвиговой упругостью, и в них могут распространяться поперечные волны. Распространение электромагнитных волн происходит вследствие того, что появляющееся в какой-либо точке пространства переменное электрическое поле возбуждает в соседних точках магнитное поле и наоборот.

Различие физических механизмов, реализующих волновой процесс, приводит к различным способам описания, основанным на сильно отличающихся друг от друга системах уравнений. Однако для понимания наиболее фундаментальных явлений, свойственных волнам различной природы – интерференции, дифракции, дисперсии, отражения и преломления, рассеяния и т.д., - часто нет необходимости анализировать исходные, вообще говоря, сложные системы уравнений. Простые эффекты, как правило, описываются простыми и поэтому универсальными математическими моделями.

Излагая современную теорию волн, необходимо особо остановиться на нелинейных волновых процессах – сравнительно новом круге вопросов, в последнее время нашедших ряд важных практических применений.

Известно, что в теории колебаний нелинейные процессы играют очень большую роль. Развитие нелинейной теории колебаний тесно связано с развитием радиотехники, поскольку процессы генерации, модуляции и приема радиоволн связаны с нелинейными колебательными процессами. В то время, когда для целей радиосвязи использовались радиоволны с длиной порядка десятков и сотен метров, можно было считать, что длина волны намного превышает размеры приемных и передающих устройств и нелинейные явления, лежащие в основе их работы, имеют характер колебательных процессов. Процессы же передачи электромагнитной энергии

от передатчика к приемнику – волновые процессы – почти всегда можно было считать линейными.

С переходом к сантиметровым и миллиметровым волнам длина волны стала сравнимой или даже меньшей размеров приемной и передающей аппаратуры. Были созданы генераторы и усилители, принцип работы которых основан на закономерностях волновых процессов – электронные лампы с бегущей и обратной волной и т.д., появились материалы с нелинейными характеристиками в диапазоне СВЧ.

После создания источников мощного ультразвука началось интенсивное изучение нелинейных эффектов при распространении звуковых волн в среде. Эти эффекты существенны, когда возмущения характерных параметров – давления, плотности, и др. – не слишком малы по сравнению с их равновесными значениями. Мощная синусоидальная звуковая волна, например, в слабо диссипативной среде превращается на некотором расстоянии в пилообразную волну.

Создание оптических квантовых генераторов позволило реализовать электромагнитные поля, напряженность которых сравнима с внутриатомными полями, и осуществить, таким образом, взаимодействие световых волн.

Увеличение интенсивности звуковых и световых полей привело к тому, что нелинейные эффекты при распространении волн стали сейчас иметь столь же большое значение, как и нелинейные процессы в теории колебаний. Не так давно появились две новые области – нелинейная оптика и нелинейная акустика, значительно расширившие область использования волновых явлений. В настоящее время взаимодействие волн активно исследуется.

Глава III Изучение волновых явлений в школе

Колебания и волны различной природы изучаются в школе в настоящее время в одном «волновом» центре. Такое объединение учебного материала вызвано двумя причинами: нет такой области физики и техники, где бы ни проявлялись колебательные и волновые процессы; соответствующие законы обладают универсальностью и всеобщностью.

Колебательные и волновые движения - один из самых распространённых движений в природе, поэтому изучение колебаний - это мощный инструмент познания, универсальный ключ ко многим тайнам природы. Недаром академик Л. И. Мандельштам говорил, что если посмотреть на историю физики, то можно увидеть, что главные открытия, по существу, были связаны с колебательными процессами.

Несмотря на то, что все колебательные и волновые процессы обладают универсальностью и всеобщностью, но, как мы выявили ранее, они очень отличаются друг от друга, это необходимо донести до учащихся.

Времени для изучения данного раздела дается немного, поэтому для большего изучения и для большего понимания материала учащимися, необходимо проводить дополнительные занятия. В лучшем случае увеличить учебное время для изучения этого материала. Для полного понимания, что это такое, лучше будет, если учитель будет показывать все на практике. опыты, или, например, будет использовать какую-либо программу на компьютере, для демонстрации волновых процессов. Сейчас все чаще учителя используют компьютеры на своих уроках для лучшей наглядности.

На уроках физики при изучении колебательных и волновых процессов важно выделить, какие волновые процессы связаны с продольными волнами, поперечными и т.д. Это необходимо для того, чтобы лучше понимать физику этих явлений и их проявлений в окружающем мире.

Заключение

Проведенный анализ по рассмотрению волновых явлений различной природы показал, что несмотря на наличие во всех случаях единого физического процесса – волнового, в каждом конкретном случае, для каждой среды, для каждого силового поля есть свои особенности и различия в проявлениях таких волновых процессов. Одни волны – продольные, другие поперечные, третьи – продольно – поперечные, четвертые – поперечно-поперечные. Однако, в любом случае, мы видим, что многообразие физических явлений окружающего нас мира так или иначе связано с волновыми процессами или описываются ими. Вообще говоря, оказывается, что все в мире описывается колебаниями и волнами!

Список литературы

1. Александров Н. В., Яшкин А. Я. Курс общей физики. Механика. – М.: Просвещение, 1978.
2. Архангельский М. М. Курс физики. Механика. – М.: Просвещение, 1975.
3. Ахиезер А.И. Электромагнетизм и электромагнитные волны. - М.: Высшая школа, 1985
4. Бутенин Н.В., Ю.И. Неймарк, Н.Л. Фуфаев. Введение в теорию нелинейных колебаний. - М.: [не указано], 1982.
5. Детлаф А. А., Яворский Б. И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1989.
6. Дмитриева В.Ф., Прокофьев В.Л. Основы физики. Учебник для вузов. - М., 2001.
7. Дущенко В. П., Кучерук И. М. Общая физика. – К.: Высшая школа, 1995. – 430с.
8. Зисман Г. А., Годес О. М. Курс общей физики. В 3 т. – М.: Наука, 1995.
9. Иродов И. Е. Волновые процессы. Основные законы. Учебное пособие для вузов. - М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2006.
- 10.Калитеевский Н. И. Волновая оптика. - М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства "Наука", 2014.
- 11.Кингсеп А.С., Ю.М. Ципенюк. Основы физики. Курс общ. физики в 2-х т. Том 1. Механика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика: Учебник для вузов. - М.: Физматлит, 2007.
- 12.Кузнецов С.И. Физика: Механика. Механические колебания и волны. Молекулярная физика. Термодинамика: Учебное пособие. – М.: Гриф МО РФ, 2000.
- 13.Кузнецов С. И. Физика. Механика. Механические колебания и волны. Молекулярная физика. Термодинамика. Учебное пособие. – М.: Гриф МО РФ, 2000.
- 14.Лайтхилл Д. Волны в жидкостях . - М.: [не указано], 1981.

15. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. Том III. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика – М.: Репринт 10 издание перераб, 1995.
16. Лившевский В.П. Физика вокруг нас. – Москва, 1974.
17. Матвеев А.Н. Оптика. Учебник для вузов. - М.: Просвещение, 1985.
18. Орир Д. Физика. Том 1. –М.: Просвещение, 1981.
19. Пейн Г. Физика колебаний и волн. – М.: Мир, 1979.
20. Пул Ч. Справочное руководство по физике. Фундаментальные концепции, основные уравнения и формулы. Перевод с англ. - М., Мир, 2001.
21. Рабинович М.И., Д.И. Трубецков. Введение в теорию колебаний и волн. - М.: [не указано], 2001.
22. Россель Ж. Общая физика. – М.: Мир, 1964.
23. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 1. Механика, колебания и волны, молекулярная физика. – М.: Просвещение 1970.
24. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. Учебник 2-е изд. – М.: Просвещение, 1982.
25. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Механика. Том 1. - М.: Наука, 1979.
26. Травин Г.А. Электромагнитные поля и волны. – Б.: БелГУ, 2007.
27. Трофимова Т.И. Курс физики. Учебник 11-е изд. – М., Просвещение 2006.
28. Фриш С.Э., А.В. Тиморева. Курс общей физики. Физические основы механики. Молекулярная физика. Колебания и волны. Том 1. - СПб.: Лань, 2006.
29. Фриш С.Э., А.В. Тиморева. Курс общей физики: Учебник. В 3-х тт. Физические основы механики. Молекулярная физика. Колебания и волны. Том 1. - СПб.: Лань, 2008.

30. Яворский Б.М., А.А. Пинский. Основы физики. Учебник в 2-х кн. Кн. 2: Колебания и волны. Квантовая физика. Физика ядра и элементарных частиц. - М.: Физматлит, 2003.