Возникновением волн на поверхности раздела пресной и соленой воды объясняется интереснейшее явление — так называемая «мертвая вода», наблюдаемая недалеко от устьев рек, особенно в скандинавских фиордах. Идущие корабли вдруг тормозятся вследствие того, что корабль, попав на поверхность раздела пресной и соленой воды, разводит на ней невидимую с поверхности моря волну.

Смежные слои атмосферы могут иметь различную плотность благодаря разности температур. На поверхности раздела таких слоев атмосферы нередко возникают волны, которые движутся с очень малой скоростью и становятся заметными вследствие периодической конденсации водяного пара, поднимаемого на гребнях волн в более холодные слои атмосферы, где он образует так называемые «волнистые» облака.

§ 64. Интерференция волн. Стоячие волны

Очень часто в среде одновременно распространяются не один, а несколько волновых процессов; например, так обстоит дело в том случае, когда несколько колебательных систем одновременно излучают волны. При этом каждая частица среды, попадающая в такое сложное *волновое поле*, совершает результирующее колебательное движение, определенным образом складывающееся из колебаний, вызванных каждым из волновых процессов.

Результирующее смещение частицы среды в любой момент времени является геометрической суммой смещений, вызываемых каждым из складывающихся колебательных процессов в отдельности. Таким образом, каждый из одновременно существующих волновых процессов распространяется в среде так, как если бы никаких других одновременных процессов не существовало. Сформулированный здесь закон сложения колебаний или волн обычно называют *принципом суперпозиции*[1]) (независимого наложения волновых или колебательных процессов друг на друга).

Важный пример независимого сложения колебаний дают звуковые волны, распространяющиеся от нескольких источников звука. Слушая игру оркестра или пение хора, мы можем, сосредоточив внимание, различить каждый отдельный инструмент и каждый отдельный голос. Если бы принцип суперпозиции был ложен и складывающиеся колебания не продолжали существовать в результирующем сложном процессе, то речь и музыка сделались бы невозможными.

Представим себе два распространяющихся через одну и ту же точку среды волновых процесса *с одинаковой частотой и с одинаковым направлением смещения* частиц; если скорости распростра-

[1]) От латинского super — над и positio — положение.

нения обоих процессов одинаковы и сами процессы во всем подобны друг другу, то в выбранной нами точке среды оба процесса будут иметь *постоянную разность фаз.*

Физически все эти условия удовлетворяются в том случае, когда *источником обеих серий волн является одна и та же колебательная система.* Получение же от одного источника двух серий волн можно осуществить хотя бы путем использования наряду с прямой волной еще и волны отраженной.

Как уже упоминалось в § 58, такое сложение нескольких колебаний, при котором они либо усиливают, либо ослабляют друг друга, носит название *интерференции* [1]). Условиями возможности интерференции волн являются одинаковая частота, одинаковое направление смещения частиц и постоянство разности фаз, т. е. физически — общность источника интерферирующих колебаний (так называемая *когерентность* [2]) волн).

Математическое рассмотрение вопроса об интерференции двух (в более общем случае нескольких) волн приводит к уже знакомым нам формулам сложения колебаний.

Пусть ω есть угловая частота двух когерентных волн, распространяющихся от источников S_1 и S_2; тогда в точке P, находящейся от S_1 и S_2 на расстояниях y_1 и y_2, будут складываться два колебания:

$$x_1 = a_1 \sin \omega \left(t - \frac{y_1}{u} \right),$$

$$x_2 = a_2 \sin \omega \left(t - \frac{y_2}{u} \right).$$

Вводя в эти уравнения начальные фазы колебаний

$$\varphi_1 = -\frac{\omega}{u} y_1 \quad \text{и} \quad \varphi_2 = -\frac{\omega}{u} y_2,$$

перепишем уравнения колебательных движений в уже знакомой нам форме:

$$x_1 = a_1 \sin (\omega t + \varphi_1),$$

$$x_2 = a_2 \sin (\omega t + \varphi_2).$$

Сложение этих колебаний дает (§ 58) результирующее колебание с амплитудой

$$a = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos (\varphi_1 - \varphi_2)};$$

так как

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\omega}{u} (y_2 - y_1) = \frac{2\pi}{\lambda} (y_2 - y_1),$$

то

$$a = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos \frac{2\pi\delta}{\lambda}}, \tag{3}$$

[1]) От французского interférer — вмешиваться.

[2]) От латинского cohaerere — находиться в связи.

где

$$\delta = y_2 - y_1$$

есть *разность хода* интерферирующих волн.

Формула (3) отображает следующее интересное явление: амплитуда колебаний в поле интерферирующих волн будет меняться от точки к точке в зависимости от изменения величины δ. При этом будет меняться и энергия колебаний, увеличиваясь в одних местах за счет уменьшения в других местах волнового поля. Согласно закону сохранения энергии это перераспределение энергии должно, однако, происходить без изменения полного ее запаса.

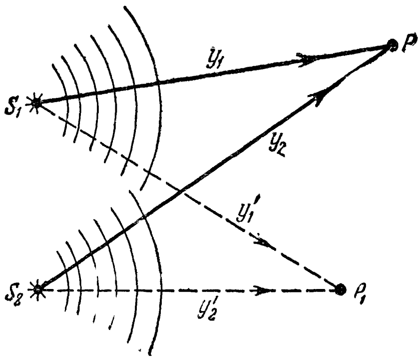

Рис. 151. К расчету интерференции волн от двух точечных источников.

Если для рассматриваемой точки P (рис. 151) разность хода интерферирующих волн обеспечивает совпадение фаз колебаний ($\varphi_1 - \varphi_2 = 0$ или $\varphi_1 - \varphi_2 = n \cdot 2\pi$, где n — любое целое число), то здесь амплитуда a результирующего колебания будет равна сумме амплитуд a_1 и a_2. В частности, когда $a_1 = a_2$, результирующая амплитуда $a = 2a_1$ и, следовательно, энергия колебания, пропорциональная квадрату амплитуды, будет вследствие интерференции в два раза больше суммарной энергии интерферирующих колебаний. Но наряду с этим увеличением энергии колебаний в одних местах волнового поля в других местах, к примеру в точке P', где разность хода волн такова, что фазы колебаний противоположны [$\varphi_1 - \varphi_2 = (2n-1)\pi$], результирующая амплитуда окажется равной разности амплитуд a_1 и a_2, и когда $a_1 = a_2$, то колебания взаимно уничтожат друг друга.

Как показывает формула (3), наибольшее усиление колебаний происходит там, где разность хода волн δ удовлетворяет равенству

$$\frac{2\pi\delta}{\lambda} = n \cdot 2\pi, \quad \text{или} \quad \delta = 2n\frac{\lambda}{2} \tag{3'}$$

(n — любое целое число).

Наибольшее ослабление колебаний происходит в тех местах волнового поля, где

$$\frac{2\pi\delta}{\lambda} = (2n-1)\pi,$$

т. е.

$$\delta = (2n-1)\frac{\lambda}{2}. \tag{3''}$$

Итак, когда на один поток бегущих волн (порождающих последовательно во всех точках рассматриваемой части волнового поля одинаковые колебания) накладывается другой когерентный поток таких же волн (порождающий во всей рассматриваемой части волнового поля колебания с той же амплитудой), то сложение (интерференция) этих волн приводит к *стабильному* (т. е. не изменяющемуся со временем) *расчленению волнового поля на чередующиеся области* двух родов (и пространственные слои между ними, промежуточные

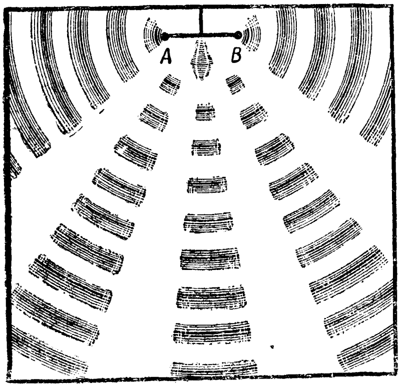

Рис. 152. Интерференция волн от двух точечных источников.

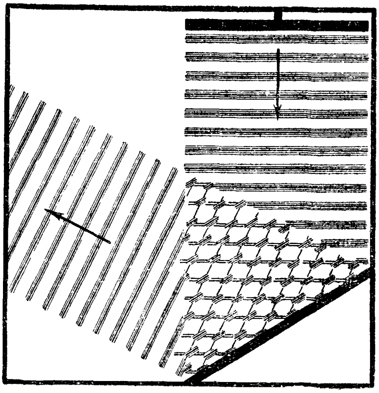

Рис. 153. Интерференция падающих и отраженных волн.

и в энергетическом отношении): 1) области интерференционного усиления, где колебания происходят с энергией в два раза большей, чем сумма энергий интерферирующих колебаний, и 2) области интерференционного ослабления, где колебания взаимно уничтожаются. Геометрическое положение *слоев интерференционного усиления* колебаний определяется равенством *разности хода волн четному числу полуволн*, а положение слоев интерференционного *ослабления* колебаний определяется равенством разности хода волн *нечетному* числу полуволн.

На рис. 152 схематически показана картина интерференции волн на поверхности жидкости; такую картину можно наблюдать, если вызывать волны колебательным движением вертикально расположенных палочек A и B, которые имеют общую опору и (посредством передачи движения от небольшого моторчика) синхронно опускаются в воду и поднимаются из нее. Рис. 153 дает схематическое представление об интерференции падающих и отраженных волн (также для случая волн на поверхности жидкости, вызванных в данном случае колебательным движением пластинки).

Если на пути расходящихся круговых волн, образованных на поверхности воды, поместить небольшое препятствие (неподвижный стержень A на рис. 154 и 155), то это препятствие само становится источником, конечно, более слабых, но легко различимых круговых волн. Это явление называют *рассеянием волн*. При рассеянии также наблюдается интерференция приходящих и рассеянных волн.

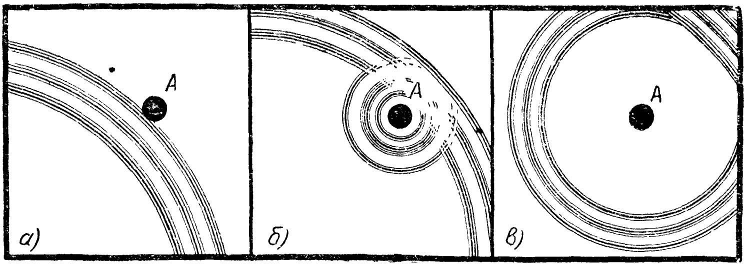

Рис. 154. Рассеяние волны, созданной прикосновением палочки к поверхности воды; три рисунка соответствуют трем последовательным моментам времени.

Явление интерференции может быть хорошо наблюдаемо со световыми лучами. При определенной величине разности ходов прямого и отраженного лучей они могут, падая на одну и ту же точку экрана, «погасить» друг друга. Этот поразительный эффект свидетельствует, наряду со многими другими явлениями, о волновой природе процесса, связанного с распространением света.

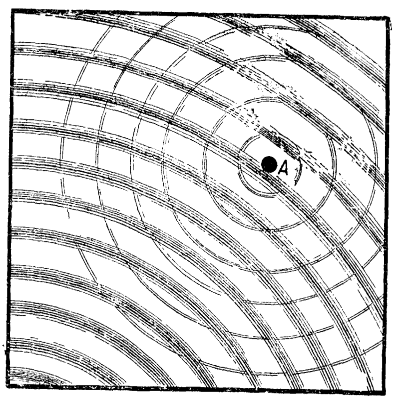

Рис. 155. Стержень A рассеивает волны, создаваемые на поверхности воды гармонически колеблющимся стерженьком.

Интерференцию можно наблюдать хотя бы на примере привязанной одним концом веревки, другой конец которой приводят рукой в колебание. Волна, бегущая по веревке, отражается от закрепленного конца и движется в противоположном направлении (рис. 156). Обе волны — прямая и отраженная — интерферируют друг с другом, причем те точки веревки, в которых разность фаз прямой и отраженной волн равна нулю, колеблются с наибольшей амплитудой, те же точки, в которых разность фаз соответствует полупериоду, остаются в покое. Такую волну называют *стоячей*, ибо в простейшем случае, когда амплитуды колебаний в прямой и отраженной волнах равны между собой, энергия не перемещается в пространстве, так как равные ее количества движутся в противоположных направлениях.

Стоячими волнами являются: колебания закрепленных по концам струн, мембран, колебания столбов воздуха в трубах (например, органных), звуковые колебания воздуха в закрытых помещениях и т. п.

Простейший из опытов, показанный на рис. 156, вскрывает замечательные особенности стоячей волны:

1) В отличие от бегущей волны, когда различные точки среды колеблются с одинаковой амплитудой, в стоячей волне амплитуда колебаний неодинакова: в одних местах (удаленных друг от друга на $\frac{\lambda}{2}$) амплитуда колебаний максимальна; эти места называют *пучностями*; в других — колебания вообще не происходят (амплитуда — нуль); эти места называют *узлами*. Таким образом, в противоположность однородной картине волнового поля бегущих волн в стоячих волнах с особенной отчетливостью проявляется характерное для всех случаев интерференции расчленение волнового поля на чередующиеся и стабильные области интерференционного усиления и ослабления колебаний.

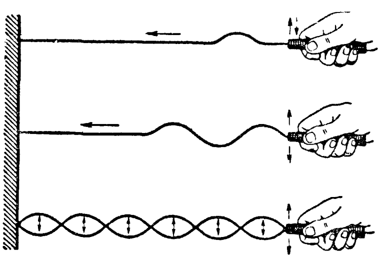

Рис. 156. Возникновение стоячей волны.

2) В отличие от бегущей волны, где в любой момент времени смежные точки среды имеют неодинаковые фазы, в стоячей волне *все точки между соседними узлами колеблются с одинаковой фазой* — все они одновременно проходят через положение равновесия. В аналогичном соседнем участке длиной $\frac{\lambda}{2}$ все точки колеблются тоже синфазно, но в противоположной фазе: когда первые приходят в положение равновесия сверху, то вторые — снизу.

3) При возникновении стоячей волны на концах ее образуется узел (как на рис. 156) или, при других *краевых условиях*, пучность. Если по условиям опыта в конечных точках колебания невозможны («концы закреплены», как на рис. 156), то понятно, что в этих местах располагаются узлы. Когда, напротив, колебания на концах возможны и даже облегчены (такие примеры будут рассмотрены в акустике), концами стоячей волны могут являться пучности. Если в случае, показанном на рис. 156, возбудив колебательное движение веревки, остановить движение руки, то в конечных точках образуются узлы стоячей волны; но если, уловив ритм стоячей волны, продолжать колебательные движения руки, сохраняя этот ритм, то стоячая волна будет оканчиваться у руки пучностью.

4) Когда происходит *отражение волны от более плотной среды*, то в месте отражения фаза скачком изменяется на противоположную — *теряется полволны*. Случай, показанный на рис. 156, иллюстрирует этот общий закон. Действительно, ближайший к точке закрепления узел стоячей волны расположен на расстоянии $\frac{\lambda}{2}$ от точки закрепления, т. е. от места, где происходит отражение прямой волны и возникновение обратной волны. В узле колебания для прямой и обратной волн противоположны по фазе (поэтому они и уничтожают друг друга). Вместе с тем прямая волна проходит от рассматриваемого нами предпоследнего узла до точки закрепления путь $\frac{\lambda}{2}$, и обратная волна проходит тот же путь $\frac{\lambda}{2}$. Мы видим, таким образом, что если бы при отражении не было утрачено полпериода колебаний, то фазы прямой и обратной волн должны были бы в той точке, где находится предпоследний узел, оказаться совпадающими, а не противоположными.

Выведем *уравнение стоячей волны*. За начало координат выберем такую точку, где встречные волны имеют одинаковые фазы, и будем производить отсчет времени от момента, когда начальные фазы оказались равными нулю. Для простейшего случая равных амплитуд имеем для прямой волны уравнение

$$x_1 = A \sin \omega \left(t - \frac{y}{u}\right) = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{y}{\lambda}\right),$$

и для отраженной волны, идущей в сторону отрицательных y, имеем уравнение

$$x_2 = A \sin \omega \left(t + \frac{y}{u}\right) = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{y}{\lambda}\right).$$

Результирующее смещение есть сумма обеих составляющих x_1 и x_2:

$$x = x_1 + x_2 = 2A \cos \frac{2\pi y}{\lambda} \sin \omega t. \tag{4}$$

Из последней формулы мы видим, что результирующее колебание имеет ту же частоту ω, но амплитуда его меняется от точки к точке. Во всех тех точках, для которых расстояние от источника волн (или от любой точки, в которой фазы совпадают) равно четному числу четвертей волны (т. е. любому целому числу полуволн), колебания происходят с удвоенной амплитудой; это — *пучности* стоячей волны. Напротив, во всех точках, для которых y равно нечетному числу четвертей волны, амплитуда результирующего колебания есть нуль, т. е. в этих точках колебания не происходят; это — *узлы* стоячей волны.

Для случая неравных амплитуд в пучностях волны результирующая амплитуда равна сумме амплитуд обеих составляющих, а в узлах — их разности.