

А.Г. Белявский

Теория звука в приложении к музыке
Основы физической и музыкальной акустики

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 62-63
ББК 30.6
А11

А11 **А.Г. Белявский**
Теория звука в приложении к музыке: Основы физической и музыкальной акустики / А.Г. Белявский – М.: Книга по Требованию, 2023. – 250 с.

ISBN 978-5-458-42958-0

ISBN 978-5-458-42958-0

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ПРЕДИСЛОВИЕ.

Настоящая книга представляет собою несколько переработанный курс лекций, прочитанный автором в 1920—1921 академическом году для слушателей Донской Консерватории в Новочеркасске.

В этих лекциях, в объеме двух годовых часов, автором были изложены основы физической и музыкальной акустики.

Необходимость изучения акустики для лиц, посвятивших себя музыкальному искусству, была очевидна уже давно, и курсы акустики были введены в программы русских консерваторий и некоторых музыкальных школ, но лишь в последнее время делаются попытки поставить преподавание акустики в музыкальных школах на должную высоту. Это необходимо потому, что не только в России, где это замечается особенно, но и в Западной Европе существует отсталость науки о музыке по сравнению с музыкальной практикой. Музыкальная практика во всех ее видах (творчество композитора, исполнительское искусство и производство музыкальных инструментов) почти совершенно лишена той могущественной поддержки, которую она нашла бы в тесном общении с точным знанием. Действительно, например, то, что в настоящее время называется теорией музыки, строго говоря, не есть теория, а лишь более или менее систематическое изложение ряда практических советов, подкрепленных авторитетом того или другого творца музыкальной практики. То же имеет место и в других областях: например, в инструментовке. В самом деле, разве может существовать учение о смещении и комбинации звуковых тембров без предварительного изучения самих тембров, которые являются комбинациями обертонов? Такое же, если не большее, значение имеет научный фундамент и в производстве музыкальных инструментов. Вопрос о рациональной постройке струнных инструментов все еще остается открытым, и мы видим, насколько несовершенно массовое производство этого рода инструментов.

Другим чрезвычайно важным вопросом является физико-математическое основание построения гамм и различных строев.

Вопрос о строях является одним из основных не только для музыкальной практики, но и при различных теоретических музыкальных и чисто акустических исследованиях.

Настоящая книга, по мысли автора, должна быть полезной не только лицам, посвятившим себя музыке, но и тем, кто при изучении акустики, как отдела физики, хотел бы познакомиться с основами музыкальной акустики, что совершенно необходимо, так как между музыкой, с одной стороны, и акустикой (физической и математической) — с другой, существует связь, и связь эта несравненно глубже, чем, например, связь между оптикой и живописью.

Так как настоящая книга предназначается также и для слушателей консерваторий, музыкальных техникумов и т. п. музыкальных учебных заведений, то, считаясь со средним уровнем математических познаний этого контингента читателей, пришлось отказаться от пользования высшей математикой.

В заключение считаю своим долгом выразить глубокую благодарность Н. Н. Ренчицкому, давшему мне много ценных указаний по вопросам музыкальной акустики и самоотверженно взявшему на себя тяжелый труд по ведению авторских корректур, что, вследствие моего отъезда за границу, не могло быть выполнено мною лично.

Приношу также свою благодарность проф. Д. В. Зернову, прочитавшему настоящую книгу переписанной для типографии на пишущей машине и указавшему на ошибки, вкравшиеся при переписке.

Большинство чертежей выполнено по моим указаниям моими ассистентами А. Г. Павловым и К. О. Розен, которым также пользуюсь случаем выразить свою благодарность.

Проф. А. Беляевский.

О Г Л А В Л Е Н И Е.

Предисловие	V—VI
Глава I. Возникновение и волнообразное распространение колебаний	1—35
1. Звуковые ощущения. 2. Возникновение колебаний. 3. Примеры колебания твердых, жидких и газообразных тел. 4. Частота колебаний, период колебаний. 5. Затухание колебаний. 6. Возникновение и распространение колебаний вдоль натянутой нити. Волны. Поперечные колебания. 7. Возникновение и распространение продольных колебаний. 8. Отражение волн. 9. Свободные и вынужденные колебания. Резонанс. 10. Стоячие волны. 11. Продольные стоячие волны. Скорость распространения продольных волн в газах. 12. Сложение нескольких стоячих волн. Наложение внешних гармонических колебаний на основное. 13. Теорема Фурье. Вынужденные колебания нити. 14. Сложение малых колебаний. 15. Сложение проходящих волн одинакового направления и периода. 16. Сложение проходящих волн одинакового направления, но разного периода. Биения. 17. Сложение двух взаимно перпендикулярных гармонических колебательных движений. Фигуры Лиссажу.	
Глава II. Возникновение и волнообразное распространение звуковых колебаний	36—56
18. Музыкальные звуки и их различие. 19. Скорость звука в воздухе. 20. Скорость звука в жидкостях. 21. Скорость звука в твердых телах. 22. Колебание стержней. Камертон. 23. Высота звука. Предел физиологического восприятия звука. 24. Сила звука. Длина звуковых волн. 25. Отражение и преломление звука. 26. Манометрическое пламя. Чувствительное пламя. 27. Акустический резонанс. 28. Определение относительных скоростей звука в газообразных, жидких и твердых телах по способу Кундта. 29. Интерференция звука. 30. Комбинационные тоны. 31. Принцип Доплера.	
Глава III. Музыкальные тоны. Интервалы. Музыкальные строи. Музыкальные гаммы	57—133
32. Музыкальные тоны. 33. Сирены. 34. Монохорд. 35. Музыкальные интервалы. Абсолютное число колебаний тонов. 36. Музыкальная ступень. Возникновение и развитие гаммы. Китайская и Пифагорова гаммы. Греческие лады. 37. Образование тонов квинтовыми ходами (система чистых квинт). Пифагорова комма. 38. Образование тонов терциевыми ходами, (система чистых терций). Синтоническая комма. 39. Аккорды. 40. Образование мажорной и минорной гаммы. 41. Диатонические мажорные и минорные гаммы. 42. Символическая схема чистого гармонического строя. Обозначение тонов по	

Эйтцу. 43. Необходимость приведения гаммы. 44. Квинтовый круг. 12-ступенная равномерная темперация. 45. Терциевы круги. 46. Основные оси сетки гармонического (чистого) строя. 47. Неравномерные темперации. 48. 53-ступенная равномерная темперация и гармонииум Бозанкета. 49. Гармониум Гельмгольца. Энгармоническая темперация. 50. Энгармониум Танака. 51. Гармониум Штейнера. 52. Гармониум Аппуна и гармонииум Эйтца. 53. Сравнение трех основных строев.

Глава IV. Тембр и высшие добавочные тоны (обертоны). Теория звучащих тел и музыкальных инструментов 134—176

54. Тембр.

Струнные инструменты. 55. Звуки струн. 56. Колебания струны монохорда. 57. Скрипичные флажолеты. Закон Юнга. 58. Влияние материала на звучание струн. 59. Фортепиано. 60. Смычковые музыкальные инструменты.

61. Воздушные резонаторы. Анализ и синтез звуков.

Духовые инструменты. 62. Элементарная теория звучащих открытых и закрытых труб. 63. Органные трубы. Флейта. Газовая гармоника. 64. Язычковые трубы и другие музыкальные инструменты с язычками. Их тембр.

Инструменты с негармоническими высшими добавочными тонами. 65. Звуки с негармоническими высшими добавочными тонами. Фигуры Хладни.

Человеческий голос и пение. 66. Устройство и функции органов речи. 67. Образование и тембр звуков человеческого голоса. 68. Происхождение и синтез гласных. 69. Фонограф. 70. Телефон. Микрофон. Телеграфон. Поющая Вольтова дуга.

71. Ухо. Восприятие звуков органом слуха.

Глава V. Теория консонанса и диссонанса 177—198

72. Совместное действие двух простых тонов на слух. 73. Физиологическое действие биений. Консонанс. Диссонанс. 74. Зависимость физиологического действия биений от числа их в секунду и от интервала между тонами, производящими эти биения. 75. Биение высших добавочных тонов. 76. Объяснение консонанса по Гельмгольцу. 77. Биение комбинационных тонов. 78. Биения в звуке, составленном из высших добавочных тонов. Благозвучие тона, сопровождаемого гармоническими обертонами, и диссонирование звуков, содержащих негармонические обертоны, или обертоны высших порядков. 79. Важная роль обертонов в отношении их музыкального действия. Абсолютный слух. 80. Теория происхождения комбинационных тонов. 81. Вариационные тоны. 82. Ударные тоны Кенига. Исследования Штумпфа. 83. Теория консонанса и диссонанса Штумпфа. Слияние тонов. Теория гармонии Гольдшмидта и Эттингена.

Приложения	201—227
Литература	228—229
Предметный указатель	230—239

Г Л А В А 1.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ И ВОЛНООБРАЗНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ.

§ 1. Звуковые ощущения. Звук, как явление физиологическое, есть определенного рода ощущение, воспринимаемое нашим органом слуха.

Механический характер того процесса, который вызывает в нашем ухе звуковое ощущение, состоит в колебаниях упругого тела (источника звука, звучащего тела), передаваемых нашему уху через посредство промежуточной среды (чаще всего воздуха), находящейся между звучащим телом и нами.

Если колебания неперiodические, то мы имеем дело с шумом (выстрел, треск, удар и т. п.). Возникновение музыкального звука происходит только вследствие периодических колебаний.

§ 2. Возникновение колебаний. Если тело, находящееся под влиянием некоторой силы в каком-либо положении, вывести из этого положения, то сила действует на тело так, что оно стремится возвратиться в свое первоначальное положение (состояние равновесия). То же происходит, если заставить тело изменить свою форму. Обычно тело возвращается в состояние равновесия не тотчас же, но совершает около своего первоначального положения колебания. Эти колебания особенно просты в том случае, если прост закон изменения силы с изменением величины удаления тела от первоначального положения равновесия. Наиболее простой и часто встречающийся случай, это—случай, когда сила, действующая на тело, равномерно увеличивается с удалением тела от положения равновесия, т.-е., как принято говорить, сила (f) пропорциональна удалению тела от положения равновесия (s).

$$f = \alpha \cdot s. \quad (1)$$

В большинстве случаев, встречающихся в природе, это положение будет иметь место тогда, когда максимальное удаление от положения равновесия, так называемая амплитуда колебаний, невелика.

§ 3. Примеры колебания твердых, жидких и газообразных тел. Можно указать на многие примеры сил, действующих на тело и пропорциональных удалению тела от некоторого его среднего положения. Подобный случай мы имеем при небольших изменениях форм твердого тела, когда упругие силы стремятся восстановить измененную форму. Положим, например, что упругий стержень AO (рис. 1) неподвижно закреплен в точке A . Если конец O отвести в сторону так, что стержень примет форму AM , то конец M будет стремиться обратно в O так, как если бы на него действовала некоторая сила, направленная от M в O . При небольших величинах дуги $OM = S$ можно силу f принять пропорциональной этому расстоянию, а потому конец стержня M будет совершать правильное колебательное движение (гармоническое) около точки O , если его отвести в сторону, а затем предоставить самому себе.

Маятник, отклоненный в сторону и предоставленный самому себе, под влиянием силы тяжести будет совершать колебания (качания), при чем при малых качаниях можно принять, что маятник совершает правильные (гармонические) колебания.

То же самое происходит и со спиральной пружиной. Если ее растянуть или сжать, то только после большего или меньшего числа колебаний она возвратится в положение покоя.

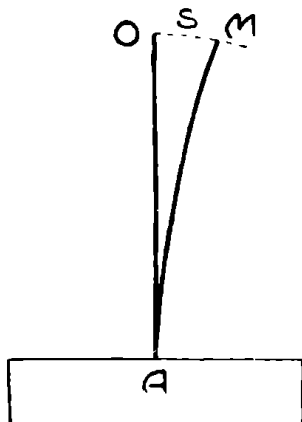


Рис. 1.

Если налить в U-образно согнутую трубку жидкость, то уровень ее в обоих коленах будет одинаков. Если произвести давление на жидкость в одном колене, то жидкость начнет колебаться в трубке. Здесь точно так, как и для случая маятника, колебания совершаются под действием силы тяжести.

Так же, как твердые и жидкие тела, могут колебаться и газы.

Если сжать воздух в каком-либо сосуде, а потом открыть его, то воздух будет выходить не только до того момента, когда исчезнет разность давлений, но и дальше, и, таким образом, возникнут по очереди разрежения и уплотнения, и это будет продолжаться до тех пор, пока не установится состояние равновесия.

§ 4. Частота колебаний, период колебаний. Число полных колебаний, совершает тело в секунду, называется частотой колебаний. Ее обыкновенно обозначают буквой N . Время полного колебания, т.-е. время от момента, когда тело занимает крайнее положение, до возвращения к этому положению, называется периодом колебаний и обозначается буквой T . Очевидно, что в течение этого времени тело два раза проходит положение равновесия.

Между частотой и периодом T существует простое соотношение:

$$T = \frac{1}{N}; \quad N = \frac{1}{T}. \quad (2)$$

Период есть величина обратная частоте. В самом деле, если колеблющееся тело делает 100 колебаний в секунду (его частота $N = 100$), то период его колебания равняется $\frac{1}{100}$ сек.

Формулы (2) легко преобразуются в выражение

$$T \cdot N = 1. \quad (3)$$

§ 5. Затухание колебаний. Колебательный процесс мы можем рассматривать, как непрерывное превращение одного вида энергии в другой. Возьмем для примера простейший маятник, состоящий из материальной массы (груза), подвешенной на нити к точке, около которой она может качаться. Отклоняя маятник, мы этим поднимаем груз на известную высоту. Груз обладает в отклоненном состоянии способностью произвести работу. Мы говорим, что он обладает потенциальной энергией (энергией положения). При процессе колебания маятника груз падает, насколько ему позволяет нить, и его потенциальная энергия уменьшается, но зато он приобретает скорость, которая

увеличивается по мере приближения маятника к положению равновесия. В этом положении потенциальная энергия исчезает и вся обращается в энергию движения (кинетическую энергию). При дальнейшем процессе колебания маятник теряет энергию кинетическую, которая обращается в потенциальную энергию.

Так как для всех процессов, совершающихся в природе, остается в силе закон сохранения энергии, то вновь приобретенная потенциальная энергия как раз равна первоначальной, т.-е. маятник поднимается как раз настолько, насколько он упадет. Другими словами, колебания маятника будут происходить вечно. Но это будет верно только в том случае, если при процессе колебания не будет происходить потери энергии во внешнее пространство. Но при всех движениях (совершающихся в природе) происходит большая или меньшая потеря энергии. Потери будут на трение в точках подвеса, на трение о воздух и т. п., и, кроме того, в большинстве случаев колебательное движение будет передаваться окружающим телам (например, воздуху). Следствием этих потерь является то, что амплитуда колебания уменьшается и колебание обращается в затухающее. Затухание тем сильнее, чем больше упомянутые выше потери энергии. Сказанное относительно маятника, конечно, относится и к другим случаям колебательного движения.

§ 6. Возникновение и распространение колебаний вдоль натянутой нити. Волны. Поперечные колебания. Если взять возможно более длинную веревку, закрепить один ее конец, и, натянув, быстро встряхнуть другой ее конец вверх и обратно в положение равновесия, то вдоль веревки побежит выпуклость (рис. 2).



Рис. 2.

Если встряхнуть конец веревки вверх и вниз и обратно в положение равновесия, то колебание от руки будет распространяться вдоль веревки, и по ней побежит волна, состоящая из выпуклости и вогнутости (рис. 3).



Рис. 3.

Эта волна побежит к месту прикрепления веревки и оттуда, отразившись, побежит обратно к руке. Скорость движения волны (V) зависит от плотности веревки и от натяжения ее, т.-е. от силы, с которой натягивается веревка. Скорость, как показывают опыт и теория, прямо пропорциональна корню квадратному из натяжения (P) и обратно пропорциональна корню квадратному из плотности (D) и площади поперечного сечения веревки (S).

$$V = \sqrt{\frac{P}{S \cdot D}} \quad (4)$$

Влиянием собственного веса натянутой веревки мы пренебрегаем.

В предыдущем примере мы сообщили веревке одно колебание. Если сообщать концу веревки непрерывно колебания вверх и вниз, то по веревке побегут волны одна за другой (рис. 4), которые, достигнув точки закрепления, отразятся и побегут обратно. Этого случая мы пока рассматривать не будем, а предположим, что веревка очень длинна, и мы рассматриваем образование волн, пока они не достигли закрепленного конца. Если непрерывно колебать свободный конец веревки, то, как было сказано выше, по веревке побегут одна за другой волны, при чем в секунду будет получаться столько волн, сколько колебаний делает рука (N).

Расстояние между двумя наиболее выпуклыми или вогнутыми точками называется длиной волны (λ). Ясно, конечно, что частицы веревки не имеют поступательного движения (движения вперед), а только колебательное, и мы

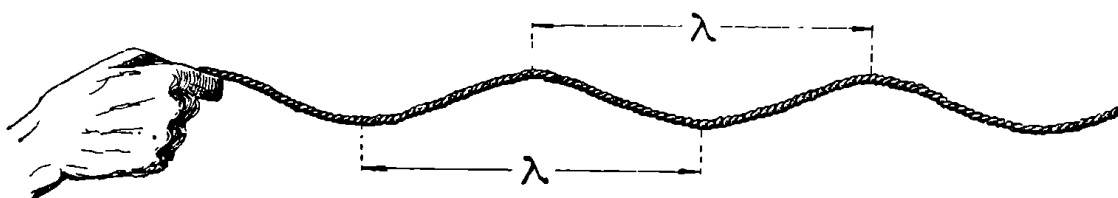


Рис. 4.

можем говорить только о движении волны, т.-е. о распространении колебательных движений вдоль веревки. Скорость распространения колебаний численно равна тому расстоянию, по которому распространяются волны за 1 сек. Ясно, что на этом расстоянии должно укладываться столько волн, сколько их образуется в 1 сек. На основании сказанного получим равенство:

$$V = N\lambda = \frac{\lambda}{T}. \quad (5)$$

Направление, в котором распространяются волны, называется **лучом**.

Колебания, подобные рассмотренным, т.-е. такие, которые совершаются перпендикулярно распространению колебаний, т.-е. перпендикулярно лучу, называются **поперечными**. Рассмотрим более подробно возникновение и распространение поперечных колебаний. Положим, что AF —прямая (веревка, нить, резиновая трубка, струна и т. п.), вдоль которой первоначально были расположены частицы, и вдоль которой распространяется колебательное движение. Сначала начинает двигаться частица A (рис. 5), несколько позднее соседняя направо частица и т. д. На рис. 6 изображено распределение частиц через $1/4$ периода ($t = \frac{T}{4}$), при чем время считается от начала колебания первой

частицы A . За время, равное четверти периода ($\frac{T}{4}$), частица A достигла крайнего положения, т.-е. совершает $1/4$ полного колебания, следующие частицы отстали от A , так как они позже ее начали свои движения. Таким образом по истечении четверти периода колебательное движение распространится до частицы B , и все частицы между A и B займут положение, указанное на рис. 6. Все частицы, лежащие за B , еще находятся в состоянии покоя.

Частица A продолжает колебание и начинает возвращаться назад. Соседние же с нею частицы в это время продолжают еще движение вперед и, достигнув крайнего положения, подобно частице A , возвращаются назад. Очевидно,

по прошествии промежутка времени, равного половине периода ($\frac{T}{2}$), частица A придет в положение равновесия, между тем как B в это время достигнет только лишь крайнего положения. В то же время частицы, лежащие слева от B ,

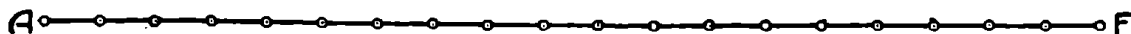


Рис. 5.

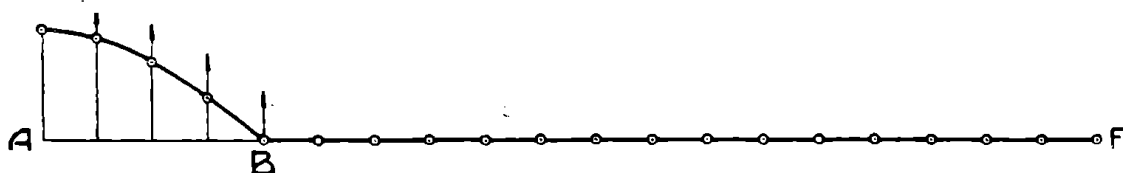


Рис. 6.

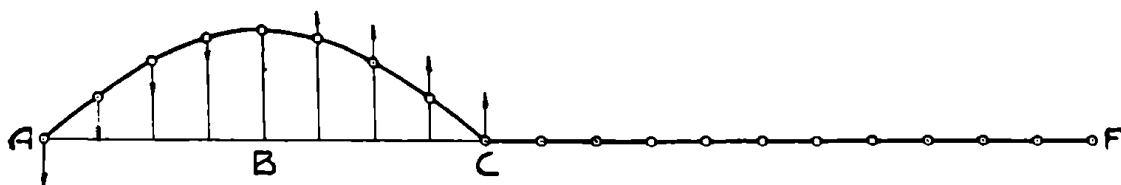


Рис. 7.

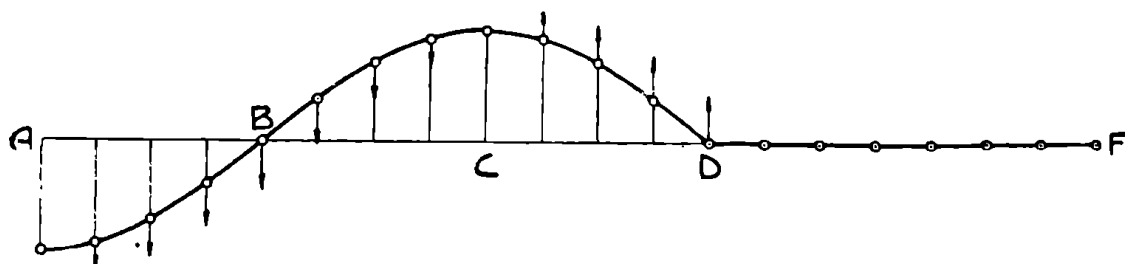


Рис. 8.

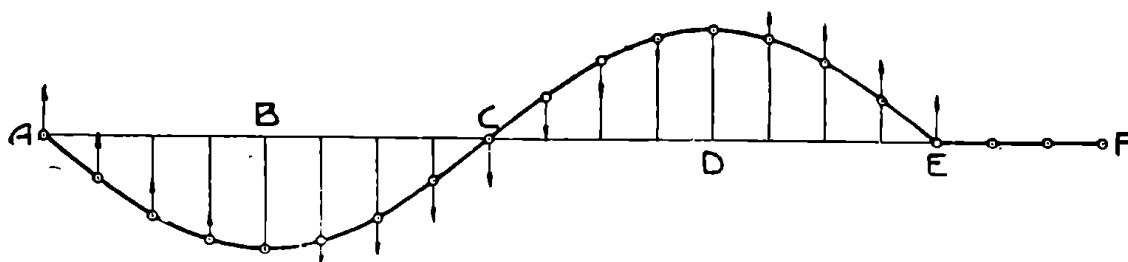


Рис. 9.

начнут возвращаться к своему положению равновесия, а частицы, расположенные справа от B и до C , придут постепенно в колебательное движение, займут положения, показанные на рис. 7.

На рис. 8 показано распределение частиц и направление их движения спустя промежуток времени, равный трем четвертям периода ($\frac{3}{4}T$), когда частица A достигнет своего крайнего нижнего положения, B совершит поло-

вину, C — четверть колебания, а частица D только начинает колебаться. На рис. 9 изображено то же спустя промежуток времени, равный одному периоду (T) после начала колебания A . Частица A , совершив полное колебание, приступает ко второму, C кончило половину колебания, B и D находятся в положениях наибольшего удаления вниз и вверх, а колебание распространилось до точки E , приступающей к первому колебанию. Таким образом, точки A и E одновременно выходят из своих положений равновесия. Очевидно, что их движения и дальше останутся тождественными, и поэтому говорят, что точки A и E находятся в одинаковых фазах. Таким образом, мы можем дать следующее определение длины волны. Длиною волны (λ) называется расстояние двух ближайших точек, находящихся в одинаковых фазах.

Продолжая рассуждать таким образом дальше, мы получим ряд волн (рис. 10). Из этого рисунка мы ясно видим, что каждые две частицы, отстоя-

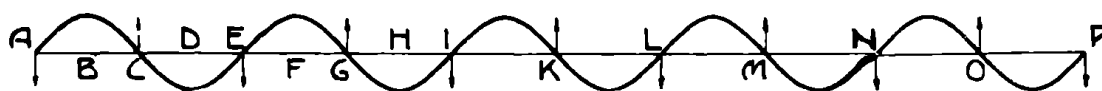


Рис. 10.

щие друг от друга на расстояние целого числа волн или четного числа полуволн ($2n \frac{\lambda}{2}$), находятся в одинаковых фазах, а частицы, удаленные

друг от друга на расстояние $(2n + 1) \frac{\lambda}{2}$, т. е. нечетного числа полуволн, находятся в противоположных фазах.

§ 7. Возникновение и распространение продольных колебаний. Представим теперь, что вместо веревки имеется достаточно длинная горизонтально



Рис. 11.

подвешенная пружина. Если толкнуть один конец ее вперед, по пружине побегут волны, состоящие из сгущений и разрежений завитков пружины (рис. 11).

Такие волны называются продольными волнами: каждый завиток колеблется вдоль того направления, по которому бегут волны. На рис. 12 изображен прибор, удобный для демонстрации продольных волн. Таким образом, продольными колебаниями называются такие колебания, которые совершаются по направлению распространения колебаний.

При продольных колебаниях частицы, расположенные в начале колебаний по прямой линии, остаются во все время колебаний на этой прямой. Изменяется только взаимное расстояние между частицами, при чем оно периодически то уменьшается, то увеличивается.

На рис. 13 изображен рисунок, данный проф. Петрушевским, показывающий последовательные изменения в распределении частиц при продольных колебаниях. На горизонтальных строках показано распределение частиц, обозначенных белыми точками, через равные промежутки времени, равные одной двенадцатой периода.