

## Лабораторная работа

### Определение длины звуковой волны и скорости звука в воздухе методом резонанса.

Оборудование: звуковой генератор с телефоном, стеклянная трубка с подвижным поршнем, измерительная линейка.

#### Описание целей работы.

Описание цели	Критерии достижения цели
<p><b>I. Изучение теории метода</b></p> <p>1.1 Основные сведения по теории механических колебаний.</p> <p>1.2 Основные сведения о механических волнах.</p> <p>1.3 Основные сведения о стоячей волне.</p>	<p>Студент должен знать определения и приводить примеры следующих физических понятий и величин:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Механическое колебание.</li> <li>2. Свободное колебание.</li> <li>3. Вынужденное колебание.</li> <li>4. Смещение.</li> <li>5. Амплитуда.</li> <li>6. Период.</li> <li>7. Частота.</li> <li>8. Уравнение гармонических колебаний</li> <li>9. Гармонические колебания.</li> <li>10. Фаза.</li> </ol> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Механическая волна, упругая среда.</li> <li>2. Направление распространения волны.</li> <li>3. Продольная и поперечная волна.</li> <li>4. Длина волны.</li> <li>5. Скорость волны.</li> <li>6. Уравнение плоской волны.</li> </ol> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Когерентные волны.</li> <li>2. Стоячая волна.</li> <li>3. Узлы и пучности стоячей волны.</li> <li>4. Акустический резонанс.</li> </ol>

#### II. Определение длины звуковой волны и скорости звука в воздухе методом акустического резонанса.

<p>2.1. Изучение экспериментальной установки.</p> <p>2.2. Практические навыки</p>	<p>Студент должен указать название, назначение и применение каждого элемента установки.</p> <p>Студент должен научиться:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- правильно определить положения поршня, соответствующие углам и пучностям стоячей волны,</li> </ul>
---	--

## 1. Основы теории

### 1.1. Механические колебания

Механические колебания – это движения, которые точно или приблизительно повторяются через определенные интервалы времени.

Колебания могут быть свободными и вынужденными.

**Свободные колебания** – колебания, возникающие в системе под действием внутренних сил после того, как система была выведена из положения равновесия. Примеры: колебания груза на пружине или груза, подвешенного на нити. Вынужденные колебания – колебания, совершаемые телами под действием каких-то внешних сил. Примеры: поплавков на воде, игла швейной машины, поршни в механизмах.

Если колебания повторяются через точные промежутки времени, то такие колебания называются периодическими, а промежуток времени периодом  $T$  (с).

**Период  $T$  колебания** – минимальный промежуток времени, через который движение тела полностью повторяется. Зная период можно определить частоту колебаний.

**Частотой колебаний** называется величина  $\nu = \frac{1}{T}$ , равная числу колебаний, совершающихся за единицу времени. Частота измеряется в герцах ( Гц ):  $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$ .

Отклонение точки от положения равновесия называют **смещением**, а наибольшее отклонение – **амплитудой  $A$** .

Для описания колебательного движения нужно подобрать функцию периодическую и непрерывную. Такими функциями являются функции  $\cos \varphi$  или  $\sin \varphi$ , где  $\varphi = \varphi(t)$ . Наиболее простая зависимость координаты тела от времени при колебательном движении будет иметь вид:

$$x(t) = A \cos \varphi(t) \quad \text{или} \quad x(t) = A \sin \varphi(t) \quad (1)$$

Уравнение (1) справедливо, если ось координат ввести вдоль движения колеблющейся точки, а за ее начало взять положение равновесия

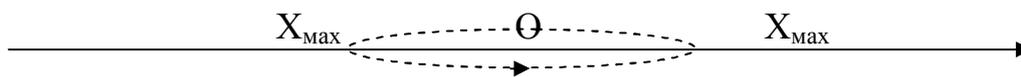


Рис.1.

Амплитуда  $A = |X_{\max}|$ , а смещение  $= |X|$

Аргумент  $\varphi(t)$  в уравнении (1) называют **фазой колебаний**. Вид функции  $\varphi(t)$ :  $\varphi(t) = \omega t + \varphi_0$  (2), где величину  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  называют круговой (циклической) частотой,  $\varphi_0$  – начальной фазой.

Положение точки при колебательном движении определяется ее фазой:  $\omega : t = 2\pi \frac{t}{T}$ , где выражение  $\frac{t}{T}$  показывает, какая доля колебания прошла от начала движения точки, а произведение  $2\pi \frac{t}{T}$  переводит эту долю в угол (в радианной мере).

Если реальное колебание совершается в согласии с уравнением (1), то его называют **гармоническим**. Таким колебанием можно считать колебания математического маятника при малых углах отклонения. Большинство колебаний в природе являются негармоническими, но их можно рассматривать как сумму гармонических колебаний.

## 1.2. Механические волны.

**Волной** называют колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени.

Любое реальное тело (твердое, жидкое, газообразное) является множеством частиц (молекул, атомов), упруго взаимодействующих между собой. Если любую точку среды вывести из положения равновесия, то она неизбежно вызывает изменение положения окружающих частиц. Если создать колебание одной частицы, то в упругой среде колебательные движения передаются от точки к точке.

Существует два типа волн: продольные и поперечные. Волны, у которых частицы среды колеблются в направлении распространения волны, называются **продольными волнами**. У этих волн чередуются области сгущения и разрежения (рис.2а). Волны, у которых частицы среды колеблются в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны, называются **поперечными волнами**. У этих волн происходит чередование горбов и впадин (рис.2б).

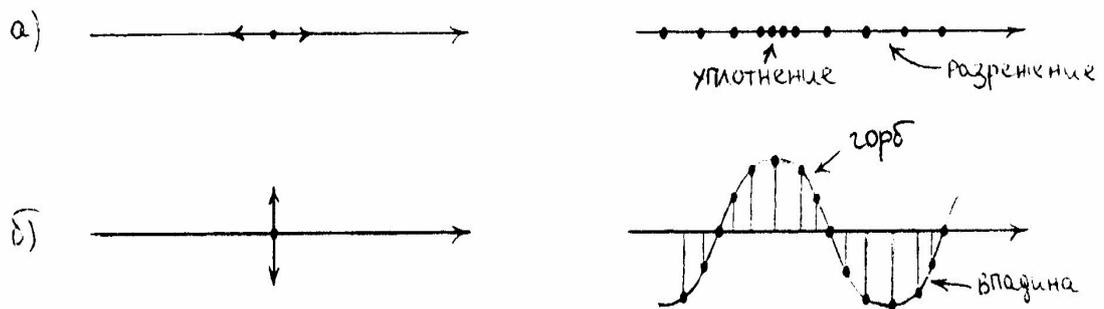


Рис 2. Продольная и поперечная волна.

Таким образом, все точки среды совершают колебания около своих положений равновесия не уходя при этом от своих мест. В простейшем случае все колебания можно считать гармоническими, происходящими с одним и тем же периодом (частотой), но с различной фазой. Различие фаз связано с тем, что каждая частица среды начинает свое колебание только после того, как вступит в движение

предыдущая, то есть каждая последующая точка отстает по фазе от предыдущей. Пусть на рис.3 точками условно изображены частицы линейной упругой среды. Если, например, колебательное движение сообщить первой частице, то ее уравнение движения будет иметь вид ( $\varphi_0 = 0$ ):  $x = A \sin \omega t$ .

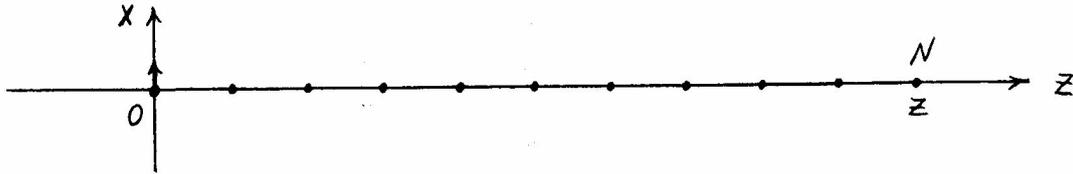


Рис.3. Распространение колебания в упругой среде.

Точка N, отстоящая от первой на расстояние  $z$  вдоль направления распространения волны, начинает свое движение позже первой точки на промежуток времени  $\tau = \frac{z}{v}$ , где  $v$  - скорость, с которой передается (распространяется) колебание. Тогда уравнение ее движения будет иметь вид:

$$x_N = A \sin \omega (t - \tau) = A \sin \omega (t - \frac{z}{v}) \quad (3).$$

Полученное выражение представляет собой уравнение плоской волны, распространяющейся вдоль направления  $z$ .

Расстояние, на которое распространяется колебание за один период, называется **длиной волны**. Оно будет также равно расстоянию между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе

$$\lambda = vT \quad (4),$$

где  $\lambda$  - длина волны,  $v$  - скорость распространения волны,  $T$  - период колебания. Или, учитывая, что  $T = 1 / \nu$ , где  $\nu$  - частота колебаний,

$$v = \nu \lambda \quad (5)$$

### 1.3. Интерференция волн.

Если в одной и той же среде одновременно распространяются колебания от двух (и более) источников (наложение волн): то каждая волна распространяется независимо друг от друга. Тогда каждая точка (частица) среды должна будет одновременно совершать два (или более) колебаний, то есть в каждой точке происходит сложение колебаний.

Так как складываемые колебания, происходящие от разных источников волн, могут иметь различные периоды и амплитуды, то результирующее колебание обычно является негармоническим. Интерес представляет случай наложения так называемых когерентных волн.

**Когерентными** называются волны, разность фаз которых в каждой точке волнового поля постоянна. Такие волны должны не только иметь одинаковую дли-

ну волны и частоту, но и излучаться источниками, работающими непрерывно в течение всего времени наблюдения.

При наложении когерентных волн, в каждой точке поля результирующее колебание будет тоже гармоническим с постоянной амплитудой, причем распределение амплитуд в волновом поле будет постоянным.

Если две когерентные волны, бегущие в противоположные стороны, встречаются, то при их сложении образуется стоячая волна. Чаще всего, стоячие волны возникают при сложении падающей одномерной волны с волной, испытавшей отражение.

При интерференции прямой и отраженной волн возникают участки, где колебательное движение отсутствует (узлы) и участки, где колебания могут происходить с наибольшей амплитудой (пучности).

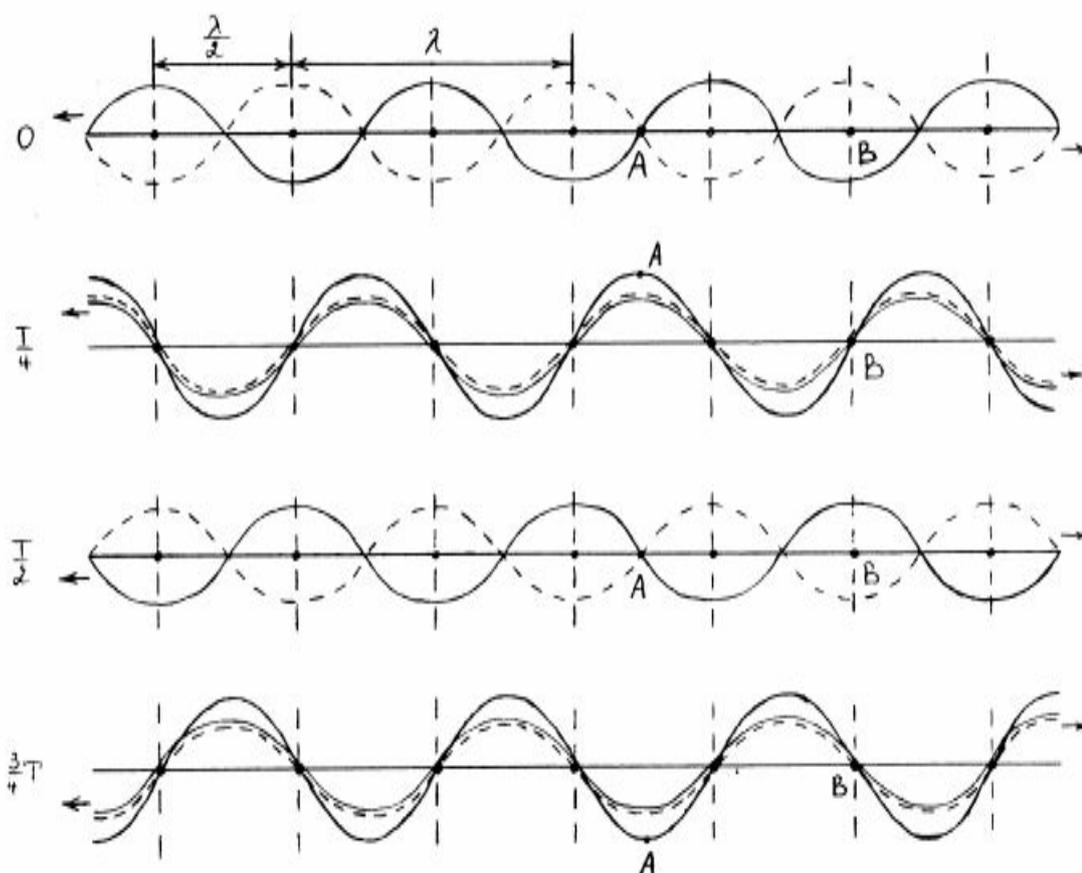


Рис.4. Образование стоячей волны.

На рис.4 пунктирной и сплошной линиями изображены положения двух волн, бегущих навстречу друг другу, через промежутки времени, равные четверти периода. Стрелками указаны направления распространения обеих волн.

За четверть периода каждая из волн перемещается на  $1/4\lambda$ . Результирующие колебания в каждой точке возникают вследствие сложения двух колебаний.

Рассмотрим движение точки A. На рис.4 при  $t=0$  обе волны создают в точке A смещение равное нулю. Точка A остается в положении равновесия. Через

время  $t = T / 4$  обе волны создают в точке А смещения, направленные в одну сторону, значит смещение точки А от положения равновесия удвоится. При  $t=3/4T$  обе волны опять смещают точку А в одном и том же направлении и общее смещение точки удвоится. Таким образом за полный период точка А совершила колебание с удвоенной амплитудой.

Рассмотрим движение точки В. При  $t = 0$ , колебания создаваемые прямой и отраженной волной в этой точке создают смещения, направленные в противоположные стороны. Так как их амплитуды равны, итоговое результирующее смещение равно нулю и она остается в положении равновесия. При  $t=4/T$  и  $3/4T$  обе волны оставляют точку в положении равновесия. При  $t=T/2$  обе волны смещают точку В в противоположных направлениях и, в результате, она вновь остается в положении равновесия.

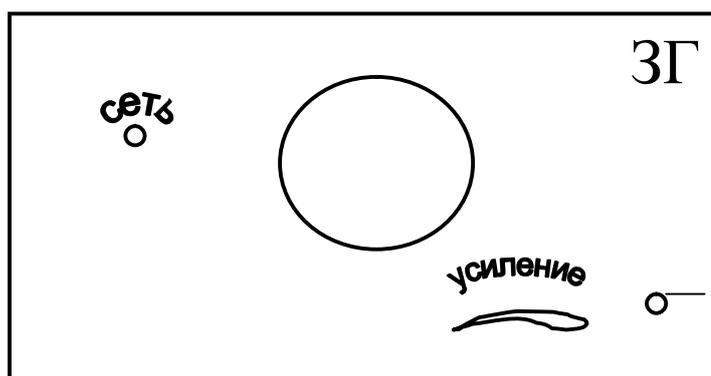
Таким образом за полный период колебания точка В остается в положении равновесия. Точки, аналогичные точке В с амплитудой колебания равной нулю, будут располагаться на луче через расстояние равное  $\lambda/2$ . Такие точки называются **узлами**. Точки, находящиеся между узлами (аналогичные точке А), будут совершать результирующее колебание с удвоенной амплитудой (см.рис.4). Такие точки называются **пучностями**. Они так же будут повторяться через  $\lambda/2$ . Расстояние между узлом и пучностью равно  $\lambda/4$ .

На рис.4 видно, что узлы и пучности не перемещаются вдоль луча. Это происходит потому, что разность фаз двух колебаний в пучностях и узлах (как и во всех других точках) не меняется со временем. Она зависит только от положения точки на луче. В результате распределение смещений точек относительно их положений равновесия в любой момент времени образует волну, которая не перемещается в пространстве. Такая волна называется стоячей волной. Расстояние между соседними узлами (или пучностями), как хорошо видно на рис.4, равно половине длины волны.

## 2. Определение длины звуковой волны и скорости звука в воздухе методом акустического резонанса.

Звуковыми (или акустическими) волнами называются распространяющиеся в среде упругие волны, обладающие частотами в пределах от 20 Гц до 20 кГц. Волны указанных частот, воздействуя на слуховой аппарат человека, вызывают ощущение звука. Волны с  $\nu < 16$  Гц (инфразвуковые) и  $\nu > 20$  кГц (ультразвуковые) органами слуха человека не воспринимаются.

### 2.1 Описание экспериментальной установки.



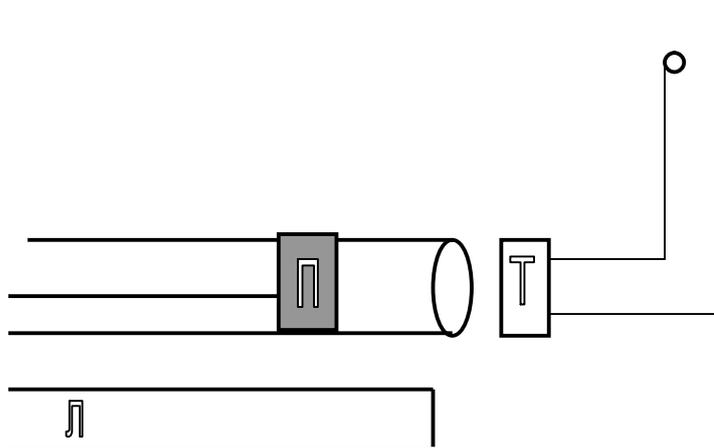


Рис. 5. Экспериментальная установка.

На звуковых волнах легко могут быть обнаружены характерные явления интерференции. Простейший опыт по интерференции звука осуществляется с помощью экспериментальной установки, состоящей из следующих частей (см.рис.5):

1. Звуковой генератор ЗГ.
2. Телефон Т.
3. Стекло́нная трубка О с подвижным поршнем П.
4. Измерительная линейка Л.

В стеклянной трубке звуковые волны, создаваемые телефоном, распространяются вдоль трубки и отражаются от поршня. Если расстояние от телефона до поршня кратно  $\lambda/2$ , то в трубке возникает стоячая звуковая волна. Причем у открытого конца трубки будет пучность волны и наблюдается резкое усиление звука, а у поршня всегда будет узел.

Если, двигая поршень, менять длину трубки, то мы будем наблюдать периодическое усиление и ослабление звука (такое явление называют акустическим резонансом). Расстояние, на которое смещается поршень между двумя последовательными усилениями или ослаблениями звука, будет равно  $\lambda/2$ .

### Звуковой генератор (ЗГ).

Этот прибор может издавать электромагнитные колебания частотой от 20 до 20000 Гц., т.е. звуковой частоты. Если на выходе генератора укрепить телефон, то телефон преобразует электромагнитные колебания в механические той же частоты (т.е. “ превращает ” в звук). Получаемую частоту можно менять с помощью диска, укрепленного на передней панели генератора.

На лицевую панель генератора (рис.б) выведены тумблер включения генератора в сеть; сигнальная лампочка Ф; переключатель поддиапазонов ПД на три фиксированных положения, отмеченных “x1”, “x10”, ”x100”; диск РШ с неравномерной шкалой деления (от 20 до 200) ; указатель шкалы У; ручка переменного резистора, позволяющая менять амплитуду выходного сигнала; выходные зажимы, рассчитанные на подключение цепей с разным сопротивлением (5, 600, 5000 Ом); также закреплены скобы Ск для предохранения органов управления от поврежде-

ния. Прибор закрыт металлическим кожухом К, на котором смонтирована ручка Р для переноски прибора. С тыльной стороны имеется панель для предохранителей и сетевого шнура.

Перед началом работы:

- Ручку “Усиление” устанавливают в крайнее левое положение поворотом против часовой стрелки;

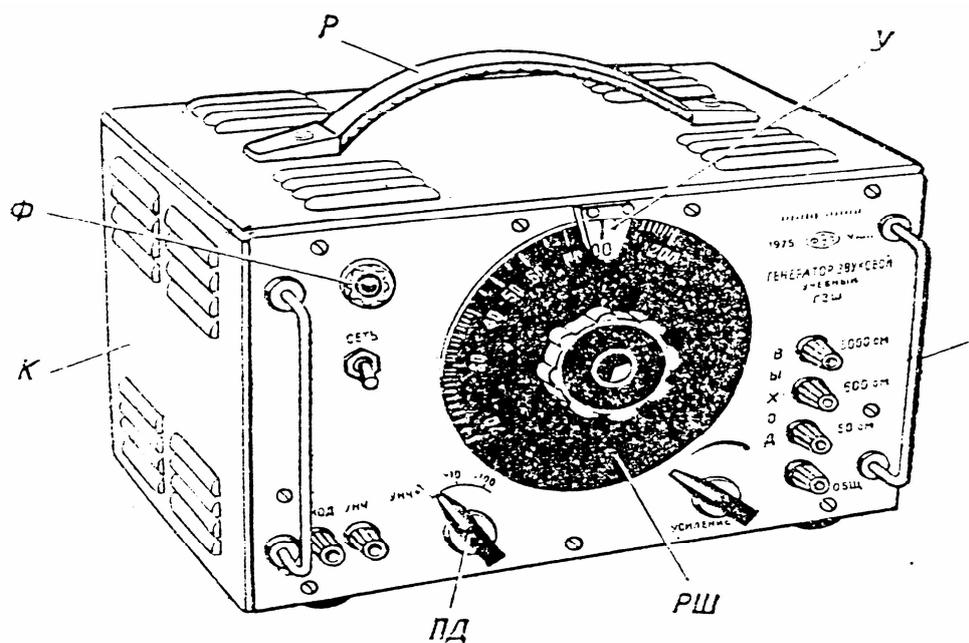
- Телефон подключают к зажимам “Общ.” и “600 Ом”, т.е. выбирают такие выходные зажимы генератора, чтобы сопротивление между ними было близким к сопротивлению подключаемого телефона;

- Устанавливают нужную частоту. Если для опытов необходимы частоты 20-200 Гц., то переключатель ПД устанавливают в положение “x1”, если 200-2000 Гц – в положение “x10”, а для частот 2000-20000 Гц. используют положение “x100”. Плавную регулировку частоты осуществляют поворотом диска РШ.

- Включение прибора в сеть осуществляют установкой тумблера в положение “Вкл.”.

- Амплитуду выходного сигнала увеличивают до необходимого значения поворотом ручки “Усиление” по часовой стрелке.

Рис. 6. Звуковой генератор.



## 2.2. Порядок выполнения работы

1. Перед тем, как приступить к работе, необходимо ознакомиться с экспериментальной установкой и получить разрешение преподавателя на выполнение работы.
2. Включите генератор в сеть и переключите тумблер “сеть” на панели ЗГ в положение “Вкл.” (при этом загорится сигнальная лампочка).
3. Спустя 2-3 мин., переключая соответствующий диапазон и вращая диск, установите указатель частоты на цифру, указанную преподавателем. Запишите эту частоту в таблицу.

Целесообразно сразу подсчитать погрешность определения частоты  $\Delta\nu$ . Если вы точно совместили деления по шкале, то погрешность прибора по частоте не превышает  $\Delta\nu = \pm (0,1\nu + 1)$  Гц.

Например, при  $\nu = 2600$  Гц,  $\Delta\nu = \pm (0,1 \times 2600 + 1) = \pm 261$  Гц.

Запишите полученную погрешность  $\Delta\nu$  в таблицу.

4. Установите в стеклянной трубке поршень рядом с телефоном.

5. Вращая ручку регулятора “Усиление”, установите силу звука такой, чтобы сигнал был едва слышен.

6. Медленно и равномерно отодвигайте поршень от телефона до тех пор, пока не произойдет резкое усиление звука. При этом необходимо отметить мелом на стеклянной трубке положение поршня. Двигая поршень дальше, произойдет еще одно усиление звука и мы отмечаем следующее положение поршня. Проводя измерения по всей длине стеклянной трубки, мы получим ряд точек, соответствующих пучностям звуковой волны.

7. Чтобы узнать среднее расстояние  $l$  между ближайшими точками, необходимо измерить линейкой расстояние  $S$  между крайними точками и разделить его на число отрезков соединяющих эти точки. Например, на рис.7  $l = \frac{S}{5}$ . Полученное значение  $l$  запишите в таблицу.

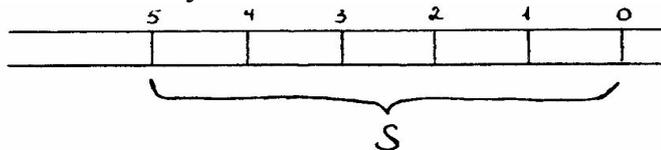


Рис.7 Нахождение среднего расстояния.

8. Стерев мел, но не меняя частоты, проведем измерения (п.п.6,7) повторно. Запишем вновь полученное значение  $l$ .

Повторив измерения несколько раз (от 3 до 8 раз) запишем все значения  $l$  в таблицу.

Например: при  $\nu = 2600$  Гц,  $l = 6,2$  см; 6,5 см; 6,6 см; 6,7 см; 6,4 см; 7,1 см; 6,3 см.

9. По полученным значениям  $l_i$ , мы находим среднее значение

$$\langle l \rangle : l_{\text{cp}} = \langle l \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \quad (6)$$

В нашем примере:  $\langle l \rangle = \frac{6,2 + 6,5 + 6,6 + 6,7 + 6,4 + 7,1 + 6,3}{7} \approx 6,54$  см.

Значение  $\langle l \rangle$  запишите в таблицу.

10. По формуле  $\lambda = 2l$  (7), где  $l = \langle l \rangle$  вычислить длину звуковой волны и результат записываем в таблицу.

В нашем примере:  $\lambda = 2 \times 6,54$  см = 13,08 см =  $1308 \times 10^{-4}$  м.

11. Вычислим погрешность длины волны:  $\Delta\lambda = 2\Delta l$ . Измерение  $l$  - прямое измерение, поэтому за истинное значение  $l$  берется её среднее значение по нескольким измерениям. Погрешность  $\Delta l$  рассчитаем как среднюю погрешность по всем измерениям, то есть:

$$\langle \Delta l \rangle = \langle \Delta l_i \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta l_i|, \text{ где } \Delta l_i = \langle l \rangle - l_i$$

В нашем примере:

$$\Delta l_1 = 6,54 - 6,2 = 0,34 \text{ см}$$

$$\Delta l_5 = 6,54 - 6,4 = 0,14 \text{ см}$$

$$\Delta l_2 = 6,54 - 6,5 = 0,04 \text{ см}$$

$$\Delta l_6 = 6,54 - 7,1 = -0,56 \text{ см}$$

$$\Delta l_3 = 6,54 - 6,6 = -0,06 \text{ см}$$

$$\Delta l_7 = 6,54 - 6,3 = 0,24 \text{ см}$$

$$\Delta l_4 = 6,54 - 6,7 = -0,16 \text{ см}$$

$$\langle \Delta l \rangle = \langle \Delta l_i \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta l_i| = \frac{0,34 + 0,04 + 0,06 + 0,16 + 0,14 + 0,56 + 0,24}{7} = 0,22 \text{ см}$$

тогда  $\Delta \lambda = 2\Delta l = 2 \times 0,22 \text{ см} = 0,44 \text{ см}$ .

Найденное значение  $\Delta \lambda$  запишем в таблицу.

12. Вычислим скорость распространения звука по формуле  $v = v\lambda$  (5) и запишем её в таблицу.

Например  $v = 1308 \times 10^{-4} \text{ м} \times 2600 \text{ Гц} \approx 340 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

13. Погрешность определения скорости звука находится как погрешность косвенного измерения, по формуле:  $\Delta v = v \left( \frac{\Delta v}{v} \div \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right)$  (8).

И значение  $\Delta v$  записывается в таблицу.

$$\text{Например : } \Delta v = 340 \frac{\text{м}}{\text{с}} \left( \frac{261 \text{ Гц}}{2600 \text{ Гц}} + \frac{0,44 \text{ см}}{13,08 \text{ см}} \right) \approx 46 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

14. Поменяем частоту и повторим измерения (см. п.п. 3,6-13),

Не забывая записывать результаты в таблицу. После окончания работы выключите звуковой генератор.

15. Запишите ответы в виде :  $v = \langle v \rangle + \langle \Delta v \rangle$ , где

$$\langle v \rangle = \frac{v_1 \div v_2 \div v_3}{3}$$

$$\langle \Delta v \rangle = \frac{\Delta v_1 \div \Delta v_2 \div \Delta v_3}{3}$$

Таблица

№ опыта	$v$ (Гц)	$\Delta v$ (Гц)	$l$ (м)	$\langle l \rangle$ (м)	$\lambda$ (м)	$\Delta \lambda$ (м)	$v$ $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$\Delta v$ $\frac{\text{м}}{\text{с}}$

### Литература

1. Майсова Н.Н. Практикум по общему курсу физики.
2. Савельев И.К. Курс общей физики.
3. Евграфова Н.Н. Курс физики
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики.

