

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА МЕТОДОМ СДВИГА ФАЗ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: определить скорость звука методом сдвига фаз.

ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ: звуковой генератор, электронный осциллограф, микрофон, динамический громкоговоритель, измерительная линейка.



КРАТКАЯ ТЕОРИЯ И МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

Звук представляет собой колебания упругой среды, воспринимаемые нашими органами слуха. Ухо человека воспринимает колебания определенной частоты и интенсивности, поэтому колебания, частота которых лежит в пределах от 16 до 20000 Гц и которые могут быть восприняты ухом, называются звуковыми.

Физиологическое восприятие звука является отражением соответствующих физических его характеристик. Так, гармоническое колебание определенной частоты воспринимается нами как определенный музыкальный тон. Физической характеристике – частоте колебаний – соответствует физиологическое понятие – высота звука. Малые частоты колебаний вызывают ощущение так называемого низкого тона (бас, баритон). Большие частоты колебаний вызывают ощущение звука высокого тона (сoprano, дискант). Чем больше колебаний, тем больше высота тона воспринимаемого звука.

Сила звука является физической характеристикой интенсивности звуковых колебаний. Мы оцениваем ее субъективно как громкость звука.

Для возникновения и распространения звуковых волн необходимо наличие упругой среды (твердое тело, воздух, вода). Возникновение волн возможно, если среда оказывает упругое сопротивление деформациям и обладает инерцией. Твердое тело оказывает сопротивление деформациям как продольным – растяжению и сжатию, так и сдвигу. Поэтому в твердом теле звуковые волны могут быть и продольные, и поперечные. В жидкостях и газах, которые не оказывают в обычных условиях сопротивления сдвигу, звуковые волны только продольные.

Многочисленные измерения скорости звука в различных газообразных и однородных твердых телах показывают, что она не зависит от частоты. Наибольшие скорости звука в твердых телах, наименьшие – в газах. Скорость звука в твердых телах для продольных и поперечных волн различаются.

При распространении звуковых волн в обычных условиях мы имеем довольно сложную картину. Звуковые волны, встречая препятствие, легкогибают его в тех случаях, когда длина волны много больше размеров препятствия, и отражаются от него примерно так же, как свет, если длина волны много меньше размеров препятствия.

При отражении звука от горы, стены и других значительных препятствий можно наблюдать, что угол падения волны равен углу отражения. В тех случаях, когда размеры препятствия сравнимы с длиной волны, законы распространения звуковой волны около препятствий становятся более сложными, имеет место и некоторое отражение и огибание (дифракция), как около небольших (по сравнению с длиной волны) препятствий.

Т.к. звуковые волны относятся к продольным механическим волнам, они характеризуются теми же величинами, что и механические волны: частотой v , периодом колебаний T , амплитудой A , начальной фазой колебания Φ_0 , длиной волны λ .

Для звуковой волны длиной λ и частотой v , как и для любого волнового процесса, скорость определяется по формуле:

$$v=v\lambda. \quad (1)$$

Следовательно, для измерения скорости звука достаточно определить длину звуковой волны в данной среде λ и частоту v , как и для любого волнового процесса.

Для измерения этих характеристик воспользуемся акустической установкой, где излучатель и приёмник звука находятся на некотором расстоянии L друг от друга. Если излучаемое звуковое колебание может быть записано в виде:

$$x = A \sin \omega t, \quad (2)$$

то колебание, достигшее приёмника будет выражаться уравнением

$$x' = A \sin(\omega t - \Delta\phi), \quad (3)$$

где $\Delta\phi = 2\pi v \frac{L}{\lambda}$ - сдвиг фазы.

Таким образом, звуковая волна, пройдя путь L от излучателя до приёмника, получает запаздывание по фазе. Отсюда следует, что

$$v = \frac{2\pi}{\Delta\phi} L. \quad (4)$$

Если зафиксировать сдвиг фаз $\Delta\phi = 2\pi n$, то из (1) и (4) видно, что этот сдвиг фаз можно получить:

а) при всех значениях L кратных λ :

$$\Delta\phi = 2\pi n = 2\pi v \frac{L}{\lambda} = 2\pi \frac{L}{\lambda},$$

отсюда:

$$L = n\lambda \quad (n=1, 2, 3, .); \quad (5)$$

б) при постоянном расстоянии между источником и приемником, но различных частотах v :

$$\Delta\phi = 2\pi n = 2\pi v \frac{L}{\lambda},$$

т.е.

$$v = \frac{n\lambda}{L} \quad (n=1, 2, 3, .). \quad (6)$$

Отсюда можно сделать вывод, что скорость звука можно определить по величине сдвига фаз, обусловленного или изменением расстояния L между источником и приемником при $v=\text{const}$, или изменением частоты v волны при $L=\text{const}$:

$$v = \frac{\lambda L}{n}.$$

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

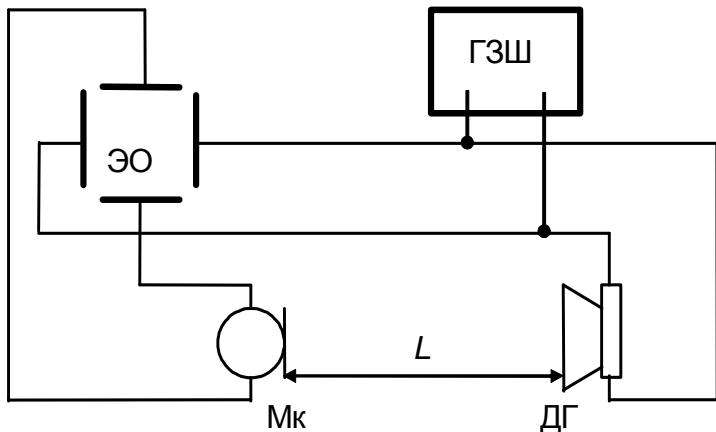


Рис. 1.

От звукового генератора электромагнитные колебания звуковой частоты подаются одновременно на вертикальные пластины осциллографа, отклоняющие электронный луч по горизонтали и на горизонтальные пластины, отклоняющие электронный луч по вертикали. При этом на вертикальные пластины колебания подаются непосредственно, а сигналы, подаваемые на горизонтальные пластины, попадают вначале на динамический громкоговоритель $\Delta\Gamma$, преобразуются в механические (звуковые колебания) той же частоты, затем, пройдя путь от громкоговорителя до микрофона и превращаясь в последнем в колебания тока той же частоты, подаются на горизонтальные пластины осциллографа. Сдвиг по времени происходит в результате прохождения звуковых колебаний от громкоговорителя до микрофона. В результате воздействия этих двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаний на луч осциллографа на экране должно получиться изображение эллипса.

Рассмотрим этот процесс. Материальная точка участвует одновременно в двух взаимно перпендикулярных колебаниях с одинаковыми периодами. За направление колебаний взяты оси ОХ и ОУ. Тогда уравнение колебаний будет:

$$x = A_1 \cos(\omega t + \phi_{01}) \text{ и } y = A_2 \sin(\omega t + \phi_{02}), \quad (7)$$

где A_1 и A_2 , ϕ_{01} и ϕ_{02} - соответствующие амплитуды и начальные фазы первого и второго колебаний.

В результате простейших преобразований из уравнений (7) находим уравнение траектории в следующем виде:

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos(\phi_2 - \phi_1) = \sin^2(\phi_2 - \phi_1). \quad (8)$$

Это уравнение представляет уравнение эллипса, характеристики которого определяются значением разности фаз ($\phi_2 - \phi_1$).

Рассмотрим частные случаи:

а) Пусть разность фаз ($\phi_2 - \phi_1$) слагаемых колебаний равна нулю, т.е. $\phi_1 = \phi_2 = \phi$. Уравнение траектории (8) в этом случае примет следующий вид:

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} = 0 \text{ или } \left(\frac{x}{A_1} - \frac{y}{A_2} \right)^2 = 0.$$

Отсюда

$$\frac{x}{y} = \frac{A_1}{A_2}.$$

Мы получили уравнение прямой, проходящей через начало координат и образующей с осью ОХ угол, тангенс которого равен $-\frac{A_1}{A_2}$ (рис. 2). По этой прямой точка совершает гармоническое колебание, при этом период результирующего колебания равен периоду слагаемых колебаний, а амплитуда результирующего колебания равна: $A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}$.

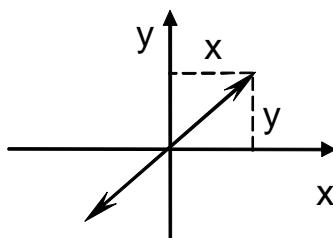


Рис. 2

б) Предположим теперь, что разность фаз ($\phi_2 - \phi_1$) слагаемых колебаний равна π , т.е. $(\phi_2 - \phi_1) = \pi$. Уравнение траектории в этом случае примет вид:

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} + \frac{2xy}{A_1 A_2} = 0,$$

откуда

$$\frac{x}{y} = -\frac{A_1}{A_2}.$$

Это уравнение представляет собой уравнение прямой, расположенной, как показано на рис. 3. По этой прямой точка совершает гармоническое колебание с той же амплитудой, что и в предыдущем случае.

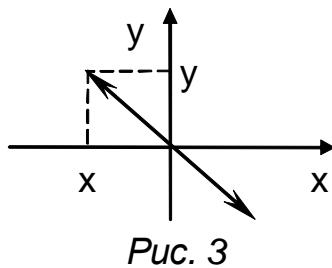


Рис. 3

в) Если разность фаз ($\phi_2 - \phi_1$) слагаемых колебаний равна $\frac{\pi}{2}$ или $\frac{3\pi}{2}$, то уравнение траектории имеет вид:

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1. \quad (9)$$

Это уравнение эллипса относительно осей ОХ и ОУ (рис. 4).

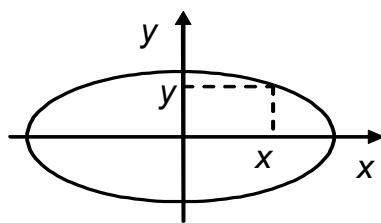


Рис. 4.

Все прочие значения разности фаз, кроме $\pm \frac{\pi}{2}$ или $\pm \frac{3\pi}{2}$, дают эллипс, не приведенный к осям ОХ и ОУ. Некоторые из возможных видов траекторий, возникающих при сложении взаимно перпендикулярных гармонических колебаний одного периода, изображены на рис.5.

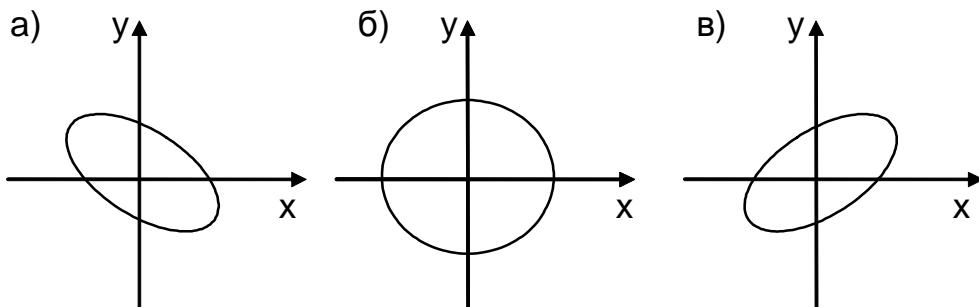


Рис. 5

Прямые на рис. 2 и 3 следует рассматривать как вырожденный эллипс. Из приведенного примера следует, что движение точки по эллипсу также может быть разложено на два взаимно перпендикулярных колебания, разность между которыми определяется видом эллипса и направлением движения точки.

Фаза колебаний, поступающих от генератора (излучателя) на ОХ пластины осциллографа, всё время одинакова. Фаза же колебаний, достигающих микрофона и попадающих на ОУ пластины осциллографа,

меняется периодически при изменении частоты излучателя v (при $L=const$) либо при изменении расстояний между излучателем и приемником при $v=const$.

Изменение разности фаз колебаний, подаваемых на пластины осциллографа при изменении либо L , либо v приводит к изменению формы и положения эллипса на экране. При условии постоянства амплитуды колебаний во время опыта и отсутствия нелинейности искажений картина на экране такова: при некотором расстоянии L при $\phi=0$ на экране эллипс вырождается в прямую, проходящую в первом и третьем (во втором и четвёртом) в квадрантах координатной сетки экрана осциллографа. Одну из этих прямых обычно принимают за начальную точку отсчёта. При перемещении динамика на $\Delta L = \frac{\lambda}{2}$ прямая переходит в эллипс, который вращается около нулевой точки координатной оси и опять переходит в прямую, но проходящую уже через второй и четвёртый или первый и третий квадрант. Если изменить ΔL ещё на $\frac{\lambda}{2}$ (т.е. уже $\Delta L = \lambda$), то на экране получится прежняя картина (прямая, проходящая через 1 и 3 или 2 и 4 квадранты). Аналогичное изменение картины на экране осциллографа можно получить, изменяя частоту генератора v при расстоянии $L=const$ между динамиком и микрофоном.

ХОД РАБОТЫ

ЗАДАНИЕ 1. Определение скорости звука изменением расстояния между излучателем и динамиком

1. Включив звуковой генератор и установив любую частоту в пределах от 2000 Гц до 13000 Гц, получите на экране осциллографа эллипс.

2. Изменением расстояния между динамиком и микрофоном превратите в прямую, проходящую через 1 и 3 или через 2 и 4 квадранты. Определите начальное расстояние между микрофоном и динамиком $L_{\text{нач}}$.

3. Перемещайте динамик от начальной точки навстречу микрофону или от него. При $v=\text{const}$ наблюдайте периодическое изменение картины на экране осциллографа. Определите при этом число полных периодов изменения картины n .

4. Определите конечное расстояние между микрофоном и динамиком $L_{\text{кон}}$.

5. Вычислите длину волны звука по соотношению $\lambda = \frac{\Delta L}{n}$, так как одно полное изменение картины на экране осциллографа соответствует изменению на длину волны λ .

6. Проведите подобные измерения для 3-5 разных значений частот (2 кГц-13 кГц) в пределах 10 см $< L < 100$ см.

7. По формуле (2) рассчитайте скорость звука. Результаты измерений занесите в табл. 1.

Таблица 1

№	v , Гц	$L_{\text{нач}}$, м	$L_{\text{кон}}$, м	ΔL , м	n	λ , м	v , м/с

ЗАДАНИЕ 2. Определение скорости звука при изменении частоты

1. Установив расстояние $L=(40-85$ см) между микрофоном и громкоговорителем, изменяйте частоту генератора и получите на экране осциллографа прямую линию в любых квадрантах. Зафиксируйте значение частоты $L_{\text{нач}}$.

2. Вращая ручку лимба генератора, отсчитайте число полных периодических изменений картины на экране осциллографа n ($n>3$).

3. Заметив частоту конечную, вычислите изменение частоты, а затем скорость звука по выражению: $v = \frac{\Delta v}{n} L$.

4. Измерение повторить 3-5 раз для разных значений расстояний между микрофоном и громкоговорителем. Результаты измерений занесите в табл. 2.

Таблица 2

<i>№</i>	<i>L, м</i>	<i>v_{нач}, Гц</i>	<i>v_{кон}, Гц</i>	<i>Δv, Гц</i>	<i>n</i>	<i>v, м/с</i>

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем отличается колебательный процесс от волнового? Запишите уравнения обоих процессов, дайте определения основных параметров.
2. Что такое звук? Каковы характеристики звука (объективные и субъективные)?
3. Что получается в результате сложения колебаний одного направления и взаимно перпендикулярных? Дайте математический вывод.
4. В чем сущность метода измерения скорости звука по сдвигу фаз?
5. От чего зависит скорость звука?
6. В чем сущность эффекта Допплера в акустике?

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Александров Н.В., Яшкин А.Я.* Курс физики. Механика: Учеб. пособие для студентов заочников физико-математических факультетов пед. институтов. – М.: Просвещение, 1978. – С.391-399.
2. *Архангельский А.З.* Курс физики. Механика: Учеб. пособие для пед. институтов. – М.: Просвещение, 1975. – С. 348-368.
3. *Евграфова Н.Н., Каган В.Л.* Руководство к лабораторным работам по физике: Учеб. пособие для радиотехн. и электроприборостроит. специальностей вузов. – М.: Высш. школа, 1970. – С. 230-231.