

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16

Определение скорости звука методом стоячих волн в трубе

Цель работы

- изучение распространения волн в упругой среде;
- изучение явления резонанса;
- экспериментальное определение скорости звука в воздухе.

Теоретические основы работы

При распространении звуковой волны в воздухе в каждой точке пространства наблюдаются попеременно деформации сжатия и разрежения, что приводит к изменению давления в среде по сравнению с атмосферным (статическим) давлением. Переменная величина — разность между атмосферным давлением и давлением в данной точке среды называется звуковым давлением $p_{зв}$, которое иногда называют избыточным.

Деформации сжатия соответствует положительное значение звукового давления, а деформации разрежения — отрицательное. Звуковое давление является функцией времени и координат:

$p(x,t) = p_0 + p_{зв}(x,t)$. На рисунке 16.1 изображены колебания давления и плотности в звуковой волне. В каждой точке среды звуковое давление действует равномерно во все стороны, является скалярной величиной и представляет собой по сути модуль силы, действующую на единицу площади поверхности. В системе СИ его измеряют в Ньютонах на квадратный метр (Н/м^2), что является Паскалем (Па). В системах вещания и связи имеют дело со звуковым давлением не превышающим 100 Па (для сравнения: нормальное атмосферное давление 760 мм рт. ст. = 101 325 Па)

Расстояние λ , на которое распространяется волна за время равное периоду колебаний частиц среды T , называется длиной волны. Частицы, отстоящие друг от друга на λ , колеблются с разностью фаз равной 2π , то есть с одинаковой фазой или синфазно.

Очевидно, что $\lambda = c \cdot T$, где c - скорость волны, T — период колебаний. Величина, обратная периоду, называется частотой или линейной частотой $\nu = \frac{1}{T}$. С учетом этого выражения, получаем соотношение:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (16.1)$$

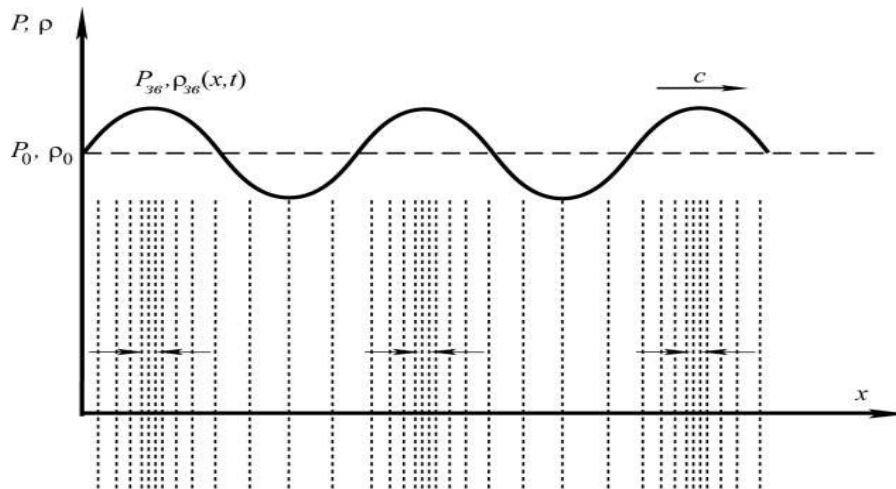


Рисунок 16.1. Колебания давления и плотности в гармонической звуковой волне связаны с образованием чередующихся областей разрежения и сгущения частиц.

Уравнение гармонических колебаний.

Каждая частица воздуха в звуковой волне совершает колебания вокруг места своего пребывания. В первом приближении каждая частица совершает **гармонические колебания** вдоль направления распространения волны:

$$\xi(t) = \xi_0 \cos(\omega \cdot t + \varphi_0) , \quad (16.2)$$

где ξ — величина сдвига частицы из положения равновесия, где ξ_0 - это **амплитуда колебания**, а выражение в скобках под косинусом называется **фазой колебания** (обычно измеряется в радианах), ω — **фазовая частота** (не путать с линейной частотой!

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\omega} \text{ или } \omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu \text{), } \varphi_0 - \text{начальная фаза колебания.}$$

Уравнение бегущей волны.

Колебания частиц в точке x_t будут отставать на время $\tau = x/c$ от колебаний частиц в точке с координатой $x=0$, и будут иметь вид:

$$\xi(x, t) = \xi_0 \cos\left(\omega\left(t - \frac{x}{c}\right) + \varphi_0\right) , \text{ где выражение в скобках } \omega\left(t - \frac{x}{c}\right) + \varphi_0$$

называется фазой волны и определяет при заданной амплитуде состояние колебательной системы в любой момент времени.

Введем величину $k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$, называемую **волновым числом**. Умножим на частоту ν числитель и знаменатель, получим волновое число в виде $k = \frac{2 \cdot \pi \nu}{\lambda \nu} = \frac{\omega}{c}$. Таким образом, **уравнение плоской бегущей волны** с учетом выражения для волнового числа и направления распространения переписывается в виде:

$$\xi(x, t) = \xi_0 \cos(\omega t \mp kx + \varphi_0) , \quad (16.3)$$

в этой формуле амплитуда колебаний не зависит от x .

Уравнение стоячей волны.

Рассмотрим случай взаимодействия или интерференции волн при наложении двух встречных плоских волн с одинаковой амплитудой и частотой. Возникающий в результате колебательный процесс называется стоячей волной.

Если сложить две волны, движущиеся навстречу друг другу, то можно получить **уравнение стоячей волны**:

$$\xi(x, t) = 2\xi_0 \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \cos(\omega t), \quad (16.4)$$

где выражение $2\xi_0 \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right)$ называется **амплитудой стоячей волны**, которая зависит от x .

Пучности и узлы стоячей волны.

В точках, координаты которых удовлетворяют условию $\cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) = 1$ или $2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm n\pi$, где $(n=0, 1, 2, \dots)$, амплитуда колебаний достигает максимального значения $2\xi_0$. Эти точки называются **пучностями волны** и их координаты равны:

$$x_{\text{пучн}} = \pm n \frac{\lambda}{2}. \quad (16.5)$$

В точках, координаты которых удовлетворяют условию $\cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) = 0$ или $2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm\left(n + \frac{1}{2}\right)\pi$, где $(n=0, 1, 2, \dots)$, амплитуда колебаний обращается в ноль всегда. Эти точки называются **узлами стоячей волны** и их координаты равны:

$$x_{\text{узел}} = \pm\left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}. \quad (16.6)$$

Поведение звуковой волны в трубе.

С одной стороны трубы поставим динамик с подвижной мембраной. А второй конец трубы закроем заглушкой.

1. Если второй конец трубы будет закрыт тяжелой **неподвижной заглушкой**, то волна отразится и пойдет обратно. Получим стоячую волну вида, как изображен на рисунке 16.2А.

Если длина трубы L , то расстояние между торцами трубы равно целому нечетному числу четвертьволн $L = (2m - 1) \frac{\lambda}{4}$, где m – целое число. На рисунке 16.2А изображен ряд мгновенных положений стоячей волны плотности для последовательных значений числа $m = 1, 2, 3, 4$.

Теперь выведем формулу для нахождения длины волны:

$$\lambda = \frac{4L}{2m - 1}. \quad (16.7)$$

2. Если второй конец трубы будет **открыт** или будет установлена **подвижная заглушка**, то волна отразится и пойдет обратно. Получим стоячую волну вида, как изображен на рисунке 16.2Б.

Аналогичным образом, как и п.1, можно получить, что между торцами трубы находится целое количество полуволен (см. рис. 16.2Б):

$$L = m \frac{\lambda}{2}, \text{ где } m - \text{целое число. На рисунке 16.2Б изображен ряд}$$

мгновенных положений стоячей волны плотности для последовательных значений числа $m = 1, 2, 3, 4$.

Теперь выведем формулу для нахождения длины волны:

$$\lambda = \frac{2L}{m}. \quad (16.8)$$

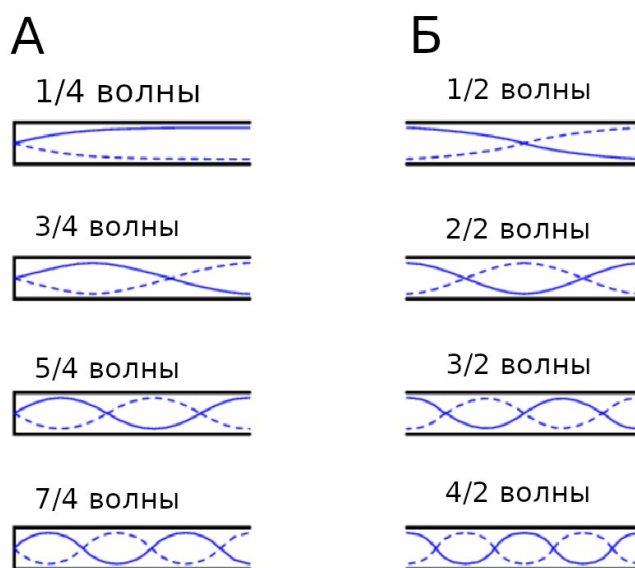


Рисунок 16.2. Схематичное изображение стоячих волн, в случае если поставим к правому концу трубы мембрану, совершающую гармонические колебания (динамик). А — левый конец трубы закрыт неподвижной заглушкой. Б — левый конец трубы открыт или там стоит подвижная заглушка. *Этот случай реализован в лабораторной установке.*

Явление, при котором, наблюдается увеличение амплитуды колебаний системы при совпадении частоты внешнего воздействия с собственной частотой называется резонансом. Определение скорости звука в настоящей работе основано на измерении разностей двух соседних частот, для которых имеет место усиление сигнала на приемнике звука. Согласно (16.1), (16.7) и (16.8) соответствующая расчетная формула имеет вид

$$c = 2L \overline{\Delta \nu}, \quad (16.9)$$

где c - скорость звука, L - длина трубы, $\overline{\Delta \nu}$ — среднее значение разностей соседних частот, на которых наблюдается резонансное усиление звука.

Экспериментальная установка.

Основные элементы экспериментальной установки, изображенной на рисунке 16.3:

1. Звуковой генератор (ЗГ).
2. Динамик — источник звуковых волн.
3. Труба — акустический резонатор.
4. Микрофон.
5. Индикатор уровня звука или осциллограф.

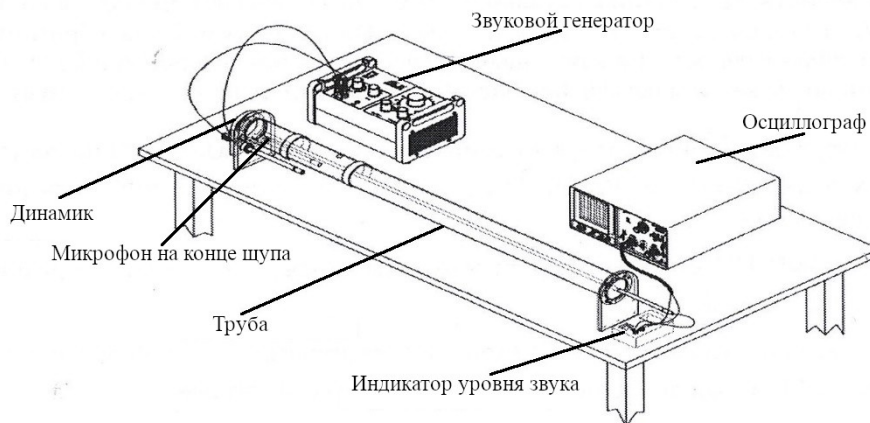


Рисунок 16.3. Внешний вид установки.

Для проведения измерений используется установка, изображенная на рисунке 16.3.

Практическая часть

Перед началом работы

1. Убедитесь, что прибор «индикатор уровня звука» работает. Для этого включите его с помощью тумблера, экран должен начать тускло подсвечиваться встроенным светодиодом. Если этого не произошло, то сообщите учителю.
2. Ознакомьтесь с установкой. Заполните таблицу спецификации измерительных приборов.

Таблица 16.1.

Спецификация измерительных приборов.

№ п/п	Наименование прибора	Измеряемая величина	Предел измерений	Цена деления	Погрешность средства измерений
1	Генератор звуковой частоты модель:				
2	Линейка на установке				
3	Индикатор уровня звука (или осциллограф)				

3. Уточните у учителя, какие опыты Вам необходимо выполнить.

Опыт 1А.

Определение скорости звука в воздухе.

1. Установите на генераторе значение $\nu_1 = 1000 \text{ Гц}$.
2. Двигая подвижную заглушку при помощи щупа с микрофоном, добейтесь эффекта резонанса. Для этого:
 - 2.1. Включите индикатор звука.
 - 2.2. Выдвиньте щуп из установки так, чтобы его конец уперся в подвижную заглушку. Поверните щуп так, чтобы его выступ попал в углубление заглушки и поверните щуп вокруг оси на $1/6$ оборота. Теперь Вы можете двигать щупом заглушку.
 - 2.3. Передвиньте заглушку примерно в середину трубы.
 - 2.4. Теперь очень медленно сдвигайте заглушку, пока показания стрелки на индикаторе звука не начнут расти. Найдите положение заглушки, когда стрелка покажет максимальное значение. Это положение подвижной заглушки и будет соответствовать искомому положению. Запишите положение заглушки в таблицу.
3. Теперь поверните щуп в другую сторону, чтобы освободить заглушку.

4. Перемещайте щуп с микрофоном в сторону динамика, заглушка должна быть неподвижна. Отметьте место, где встретили первый минимум, занесите данные в *таблицу 16.2*. Далее найдите следующий минимум и занесите его положение в таблицу.
5. Повторите *пункт 4* еще четыре раза.
6. Заполните *таблицу 16.2* до конца. Обозначения в таблице: L_1 - позиция первого минимума, L_2 - позиция соседнего минимума, ΔL - расстояние между соседними минимумами, λ - длина звуковой волны, c - скорость звука.

Таблица 16.2

Измерение скорости звука в воздухе для частоты $\nu_1 = 1000 \text{ Гц}$.

Координаты заглушки при резонансе: $L = \dots \pm \dots \text{ см.}$

№ п/п	$L_1, \text{ см}$	$L_2, \text{ см}$	$\Delta L, \text{ см}$	$\lambda, \text{ м}$	$c, \text{ м/с}$
1			////////////////	////////////////	////////////////
2			////////////////	////////////////	////////////////
3			////////////////	////////////////	////////////////
4			////////////////	////////////////	////////////////
5			////////////////	////////////////	////////////////
среднее					

Обработка результатов опыта 1А

1. Рассчитайте средние значения L_1 и L_2 .
2. Найдите значение ΔL .
3. Рассчитайте значение λ по формуле (16.8).
4. Рассчитайте значение c по формуле (16.1).
5. Запишите приборную погрешность частоты звука $\Delta \nu = \quad \text{Гц.}$
6. Запишите приборную погрешность $\Delta L_{1 \text{ пр}} = \quad \text{см.}$
7. Запишите приборную погрешность $\Delta L_{2 \text{ пр}} = \quad \text{см.}$
8. Рассчитайте $\Delta L_{1 \text{ сл}}$ и запишите случайную погрешность $\Delta L_{1 \text{ сл}} = \quad \text{см. (см. 16.13)}$
9. Рассчитайте $\Delta L_{2 \text{ сл}}$ и запишите случайную погрешность $\Delta L_{2 \text{ сл}} = \quad \text{см. (см. 16.13)}$
10. Рассчитайте ΔL_1 и запишите полную погрешность $\Delta L_1 = \quad \text{см. (см. 16.14)}$
11. Рассчитайте ΔL_2 и запишите полную погрешность $\Delta L_2 = \quad \text{см. (см. 16.14)}$
12. Рассчитайте и запишите погрешность ΔL . $\Delta(\Delta L) = \quad \text{см (см. 16.10)}$
13. Рассчитайте и запишите погрешность λ . $\Delta \lambda = \quad \text{см (см. 16.12)}$

14. Рассчитайте и запишите погрешность скорости звука

$$\Delta c = \quad \text{м/с (см. 16.11)}$$

15. Запишите ответ для полученного Вами значения скорости звука в виде доверительного интервала

$$c = \underline{\hspace{2cm}} \pm \underline{\hspace{2cm}} \text{ м/с.}$$

Опыт 1Б

Определение скорости звука в воздухе.

1. Установите на генераторе значение $\nu_2 = 4000 \text{ Гц}$.
2. Повторите пункты 2-6 опыта 1А для этой частоты и заполните таблицу 16.3.

Таблица 16.3.

Измерение скорости звука в воздухе для частоты $\nu_2 = 4000 \text{ Гц}$.

Координаты заглушки при резонансе: $L = \dots\dots\dots \pm \dots\dots\dots \text{ см}$.

N	L ₁ , см	L ₂ , см	ΔL , см	λ , м	c, м/с
1			////////////////////	////////////////////	////////////////////
2			////////////////////	////////////////////	////////////////////
3			////////////////////	////////////////////	////////////////////
4			////////////////////	////////////////////	////////////////////
5			////////////////////	////////////////////	////////////////////
среднее					

Обработка результатов опыта 1Б выполняется аналогично опыту 1А.

Обработка результатов опыта 2

1. Нарисуйте схематично изображение резонатора (от положения заглушки до динамика) и положения пучностей и узлов в нем (аналогично рисунку 16.2).
2. Найдите длину резонатора, найдите сколько волн уместилось в резонаторе $n =$.
3. По рисунку найдите длину волны $\lambda =$ м.
4. Найдите скорость звука: $c =$ м/с.(16.1)
5. Приборная погрешность частоты $\nu =$ Гц.
6. Запишите приборную погрешность определения точки L_{\max} (начало резонатора) $\Delta l_{\max} =$ см.
7. Запишите приборную погрешность определения точки L_{\min} (конец резонатора) $\Delta l_{\min} =$ см.
8. Рассчитайте и запишите погрешность λ . $\Delta \lambda =$ см (см. 16.10)
9. Рассчитайте и запишите погрешность скорости звука $\Delta c =$ м/с (см. 16.11)
10. Запишите ответ для полученного Вами значения скорости звука в виде доверительного интервала
 $c =$ _____ \pm _____ м/с.

Опыт 3

Определение скорости звука при помощи «соседних» резонансов.

1. Установите на генераторе значение $\nu_3=2000 \text{ Гц}$.
2. Найдите положение подвижной заглушки возле закрытого конца трубы, когда возникает эффект резонанса для этой частоты (повторите пункт 2 из опыта 1А). Запишите полученное значение в *таблицу 16.5*.
3. Теперь вращайте ручку генератора, отвечающую за изменение частоты, в сторону увеличения частоты. При помощи прибора «индикатор уровня звука» определите следующую частоту резонанса. Эту частоту занесите в *таблицу 16.5*.
4. Повторите *пункт 3* еще пять раз.

Таблица 16.5

Координаты максимумов и минимумов интенсивности звуковой волны при частоте $\nu_3=2000 \text{ Гц}$, длина трубы $L_{\text{ТРУБЫ}} = \dots\dots\dots \pm \dots\dots\dots \text{см.}$, координата подвижной заглушки $L = \dots\dots\dots \pm \dots\dots\dots \text{см.}$

Номер резонанса	Частота резонанса, Гц	Разность между соседними резонансными частотами $\Delta\nu$, Гц
1		////////////////////////////////////
2		
3		
4		
5		
6		////////////////////////////////////
среднее	////////////////////////////////////	

Обработка результатов опыта 3

1. Найдите среднее значение разности между соседними резонансными частотами $\overline{\Delta\nu}$ и запишите в таблицу.
2. Найдите скорость звука по формуле (16.9), где L – длина резонатора от заглушки до динамика: $c = \frac{\dots\dots\dots}{\dots\dots\dots} \text{ м/с.}$
3. Приборная погрешность координаты подвижной заглушки $\Delta L_{\text{загл.}} = \dots\dots\dots \text{ см.}$

4. Приборная погрешность определения длины резонатора (от заглушки до динамика): $\Delta L =$ _____ см.
5. Приборная погрешность частоты $\Delta \nu_1 =$ _____ Гц.
6. Приборная погрешность разности частот $\Delta \nu_{пр} =$ _____ Гц. (16.10)
7. Случайная погрешность разности частот $\Delta \nu_{сл} =$ _____ Гц. (16.14)
8. Итоговая погрешность разности частот $\Delta \nu =$ _____ Гц. (16.14)
9. Итоговое значение: $c =$ _____ \pm _____ м/с.

Выводы для всей работы

1. Запишите полученные итоговые результаты (для всех выполненных опытов в одном месте).
2. Сравните полученные результаты с табличными значениями (не забудьте указать сами табличные значения).
3. Сформулируйте вывод работы.

Контрольные вопросы

1. Что такое волна? Какие волны называются продольными? Какие волны называются поперечными?
2. Запишите уравнение гармонических колебаний, объясните смысл входящих в него величин.
3. Запишите уравнение бегущей волны, объясните смысл входящих в него величин.
4. Запишите уравнение стоячей волны, объясните смысл входящих в него величин.
5. Что представляют собой звуковые волны? Что в них колеблется?
6. Что такое интерференция волн? При каких условиях её можно наблюдать?
7. Как получаются стоячие звуковые волны? Приведите несколько примеров.
8. Сформулируйте условия пучностей и узлов в стоячей волне.
9. Как использовано явление интерференции волн в данной работе?
10. Чем отличается резонатор с открытым концом от резонатора с закрытым концом? Чем отличается стоячая звуковая волна в таких резонаторах.

Используемые методы теории погрешности

1. Если функция задана формулой вида $f(a,b)=a\pm b$, то значение абсолютной погрешности такой функции задается формулой

$$\Delta f = \sqrt{(\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}, \quad (16.10)$$

где Δa и Δb – абсолютные погрешности аргументов a и b .

2. Если функция задана формулой вида $f(a,b)=a\cdot b$ или $f(a,b)=\frac{a}{b}$, то значение относительной погрешности этой функции задается формулой:

$$\delta f = \sqrt{\delta a^2 + \delta b^2}, \quad (16.11)$$

где δa и δb – относительные погрешности аргументов a и b .

3. Если функция $f(a)$ от одной переменной, то относительная погрешность этой функции равна относительной погрешности аргумента:

$$\delta f = \delta a. \quad (16.12)$$

4. Определение случайной погрешности:

$$\Delta x_{сл.} = K_{стьюд} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{ср.} - x_i)^2}{N(N-1)}},$$

(16.13)

где $K_{стьюд}$ - коэффициент Стьюдента, N - количество измерений, $x_{ср.}$ - среднее значение, а x_i - значение x в первом, втором и т. д. эксперименте.

5. Итоговая погрешность складывается из приборной и случайной погрешностей:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{сл.}^2 + \Delta x_{приб.}^2}. \quad (16.14)$$