

Ярославский государственный педагогический
университет им. К. Д. Ушинского

Лаборатория механики

М.Л. Игольников

Лабораторная работа № 16

Определение скорости звука
по методу сдвига фаз

Ярославль
2025

Оглавление

1.	Подготовка к лабораторной работе	3
2.	Краткая теория	4
3.	Описание экспериментальной установки	9
4.	Задание и порядок его выполнения	13
5.	Содержание отчета	15

Лабораторная работа № 16

Определение скорости звука по методу сдвига фаз

Цель работы:

1. Уяснить принцип измерения скорости звука по методу сдвига фаз.
2. Приобрести практические навыки в измерении длины звуковой волны и оценки точности результатов измерений.

1. Подготовка к лабораторной работе

1. Уяснить цель и содержание лабораторной работы.
2. Изучить рекомендуемую литературу:
 - Н.В. Александров, А.Я. Яшкин. “Курс общей физики”. Механика. М, 1975 г. Занятие 28 (1; 3), Занятие 30 (1-4), Занятие 31 (1, 2).
 - М.М. Архангельский “Курс физики”. Механика. М. 1975. глава XIV §2; глава XV §2; глава XVI §4; глава XVII §§ 1,2.
 - Настоящее руководство к лабораторной работе.
3. Дать ответы на контрольные вопросы:
 - Какие процессы называются волновыми?
 - Запишите уравнение гармонической бегущей волны.
 - Дайте определение фронта волны, фазовой скорости волны, длины волны.
 - Запишите формулу для фазовой скорости звуковой волны.
 - Что такое дисперсия? Обладают ли дисперсией звуковые волны, распространяющиеся в воздухе?
 - Объясните принцип измерения скорости звука по методу сдвига фаз.
4. Изучить структурную схему лабораторной установки, ознакомиться с приданными к ним приборами, уяснить методику измерений.
5. Повторить правила безопасности.

2. Краткая теория

В природе и технике встречается огромное разнообразие процессов, называемых волновыми. К ним, в частности, относятся и процессы связанные с распространением звуковых и электромагнитных (свет, радио) колебаний.

При всех различиях в происхождении и проявлении волн они обладают целым рядом общих свойств. Эти свойства могут быть выявлены и описаны математически в общем виде, одинаковым для различных физических систем.

Какие же процессы называются волновыми? **Волновыми** называются процессы, при которых последовательность значений, пробегаемых некоторой переменной величиной ΔP в точке с пространственной координатой z_2 , повторяет последовательность её значений в точке с меньшей пространственной координатой z_1 , но с запаздыванием на время $t_{\text{зап}} = \frac{z_2 - z_1}{v}$, где v – скорость распространения волнового процесса. (см. рис.2.1.)

В качестве примера рассмотрим гармонический волновой процесс показанный на рис. 2.1 в два последовательных фиксированных момента времени.

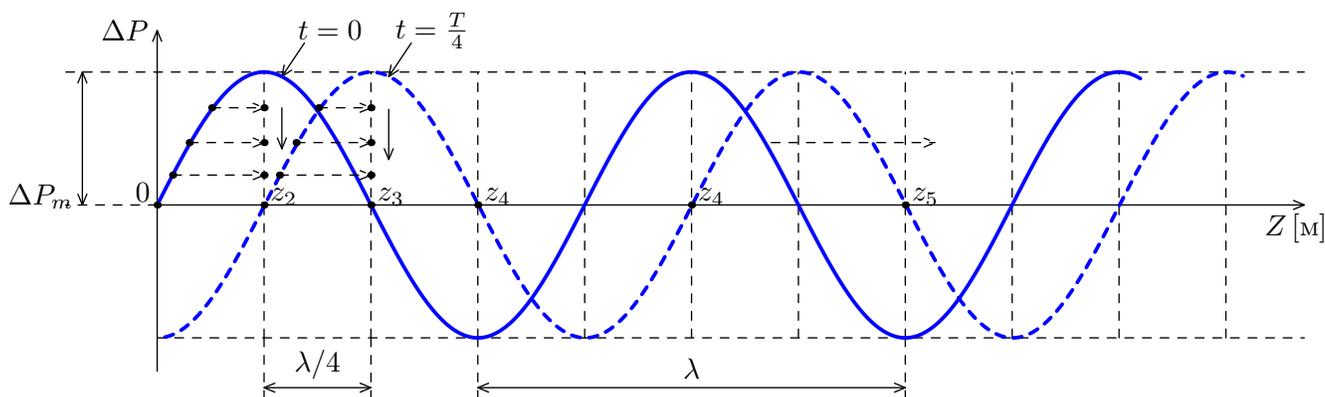


Рис. 2.1. T – период колебаний, λ – длина волны, Z – расстояние

Синусоидальная функция, изображенная на рис. 2.1, с течением времени не изменяясь по форме, как целое, перемещается в сторону увеличения пространственной координаты z со скоростью v .

Такой процесс называется бегущей волной.

Уравнение гармонической бегущей волны:

$$\Delta P = \Delta P_m \sin \omega \left(t - \frac{z}{v} \right), \quad (2.1)$$

2. Краткая теория

где ΔP_m — амплитуда волны, ω — круговая частота колебаний

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi \frac{1}{T}, \quad (2.2)$$

где ν — частота колебаний

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (2.3)$$

Преобразуем выражение:

$$\omega \cdot \frac{z}{v} = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{z}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot z, \quad (2.4)$$

где $v \cdot T = \lambda$ — длина волны.

$\frac{2\pi}{\lambda} = k$ — волновое число или фазовая постоянная волны.

С учетом формулы (2.4) уравнение (2.1) примет вид:

$$\Delta P = \Delta P_m \sin(\omega t - kz), \quad (2.5)$$

где $(\omega t - kz)$ — полная фаза волны.

Геометрическое место точек, в каждой из которых полная фаза волны есть величина постоянная, называется **фронтом** волны. Другими словами фронтом волны называется поверхность равных фаз.

Уравнение фронта волны:

$$\omega t - kz = const \longrightarrow z = \frac{1}{T} (\omega t - const). \quad (2.6)$$

Из (2.6) очевидно, что при $t = const$ и $z = const$, т. е. фронт волны плоский.

При увеличении времени возрастает и координата, т. е. фронт волны перемещается в пространстве.

Путь, проходимый фронтом волны в единицу времени, называется фазовой скоростью волны:

$$v = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k} [\text{м/с}]. \quad (2.7)$$

Путь, проходимый фронтом волны за один период колебаний, называется длиной волны, т. е.

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu} [\text{м}]. \quad (2.8)$$

Длина волны это минимальное расстояние между двумя фронтами, фазы в которых отличаются на 2π .

$$k(z + \lambda) - kz = 2\pi ,$$

$$k\lambda = 2\pi , \text{ но из (2.7) } \longrightarrow \frac{1}{k} = \frac{v}{\omega} ,$$

следовательно:

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = 2\pi \frac{v}{\omega} = T \cdot v , \text{ так как } \omega = \frac{2\pi}{T} .$$

Бегущие волны классифицируются по форме волнового фронта. Если фронт волны плоский, то и волна называется плоской. Уравнения (2.1) и (2.5) — это уравнения плоской волны. Сферическими волнами называются волны, которые имеют сферический волновой фронт. Уравнения этих волн несколько отличаются от уравнения плоской волны. Отличие, в частности, состоит в том, что амплитуда волны убывает с расстоянием.

Плоскую волну можно рассматривать как сферическую с бесконечно большим радиусом. На достаточно большом расстоянии от источника небольшие участки сферического фронта могут рассматриваться как плоские.

Вернитесь к рис. 2.1 и мысленно представьте движение волны вдоль оси Z . Обратите внимание, что в любом сечении с координатой z по мере движения волны ордината ΔP изменяет свою величину от $+\Delta P_m$ до $-\Delta P_m$. При этом в пространстве описывается вертикальная линия длиной $2\Delta P_m$. Во времени колебания ординаты ΔP происходят по гармоничному закону.

Из рис. 2.1 следует, что в точках пространства с координатами z_3 , z_4 и z_5 колебания ординаты ΔP во времени происходит по законам, представленным на рис. 2.2.

Обратите внимание, что на рис. 2.1 абсциссой является расстояние Z , а на рис. 2.2 — время. Это часто не учитывают при построении графиков рис. 2.2 и допускают ошибки в определении начальной фазы колебания (рис. 2.3).

2. Краткая теория

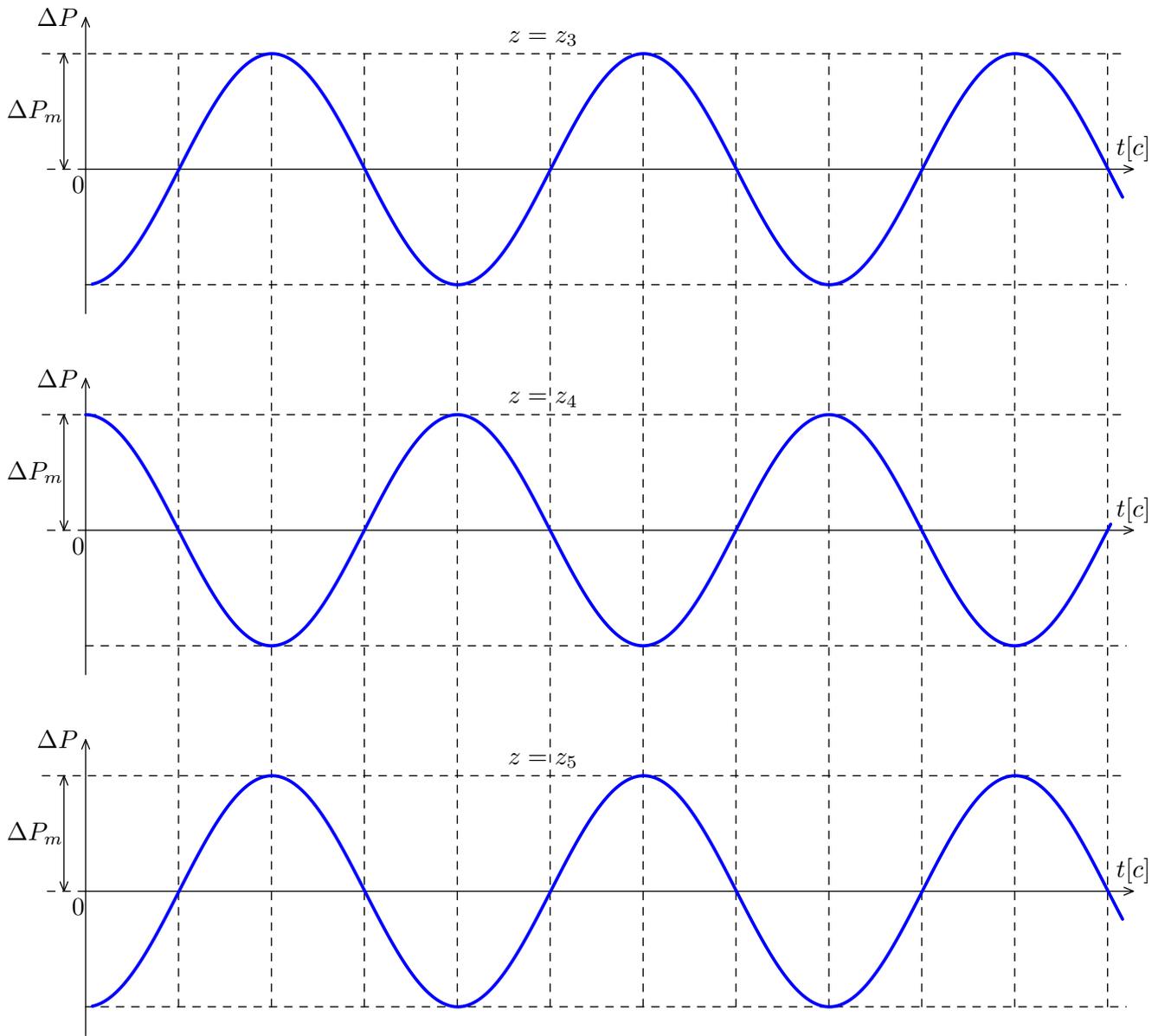


Рис. 2.2

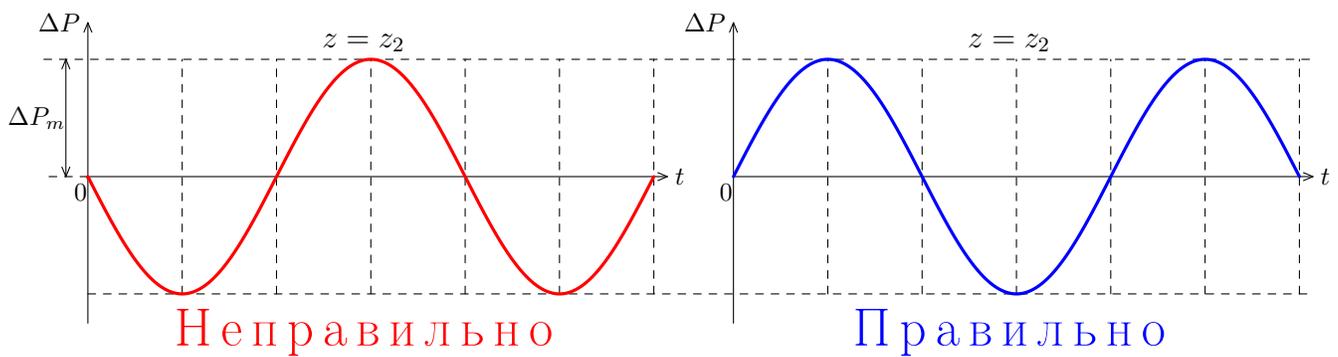


Рис. 2.3

Из рис. 2.2 следует, что колебания в точках пространства с координатами z_3 и z_5 совпадают по фазе, т. к. расстояния между этими точками равно длине волны $z_5 - z_3 = \lambda$. Вместе с тем колебания в точках пространства с координатами z_3 и z_4 происходят в противофазе, т. к. расстояние между этими точками составляет половину длины волны:

$$z_3 - z_4 = \frac{\lambda}{2} \quad \text{и} \quad z_5 - z_4 = \frac{\lambda}{2}.$$

Таковы некоторые из общих свойств процессов, именуемых волновыми.

Частота звуковых колебаний лежит в диапазоне от 20 до 20000 Гц. Колебания таких частот воспринимаются ухом человека. Колебания с частотами меньшими 20 Гц называются **инфразвуковыми**, а с частотами большими 20000 Гц — **ультразвуковыми**. Они не воспринимаются ухом человека.

Звуковые колебания, распространяющиеся в воздухе, представляют собой упругие волны, состоящие из областей с повышенным и пониженным давлением (сжатия и разрежения соответственно). В этих областях давление воздуха повышается и понижается на ΔP по отношению к давлению в невозмущенном газе. Величина ΔP называется избыточным звуковым давлением. Она может быть, как, (+), так и (–) см. рис. 2.1. В звуковой волне частицы воздуха колеблются в направлении распространения волны. Такие волны называются продольными. Форма звуковой волны определяется источником звуковых колебаний.

Скорость звуковой волны определяется формулой:

$$v = \sqrt{\kappa \frac{R \cdot T}{\mu}} = \sqrt{\kappa B T}, \quad (2.9)$$

где $\kappa = \frac{C_p}{C_v}$ — отношение теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме (показатель адиабаты или коэффициент Пуассона).

- R — универсальная газовая постоянная.
- μ — молекулярный вес.
- $B = \frac{R}{\mu}$ — удельная газовая постоянная.
- T — абсолютная температура газа.

3. Описание экспериментальной установки

Величины κ , R и μ — постоянные для данного газа. Поэтому скорость звука пропорциональна \sqrt{T} и не зависит ни от давления газа, **ни от частоты звуковых колебаний**. Последнее указывает на отсутствие дисперсии у звуковых волн (**дисперсия — зависимость фазовой скорости от частоты**).

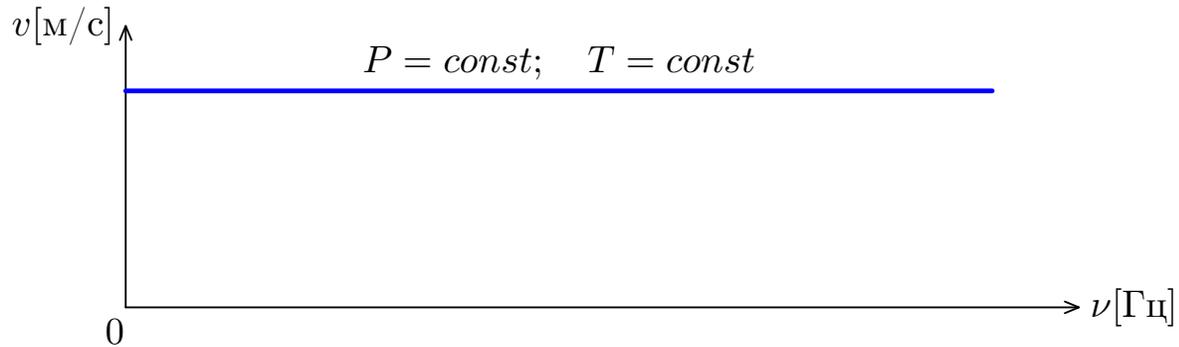


Рис. 2.4

Численные значения констант, входящих в формулу (2.9) :

$$\left. \begin{array}{l} R = (8,314 \pm 0,0005) \left[\frac{\text{Дж}}{\text{моль град}} \right] \\ C_p = (1020 \pm 0,5) \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг град}} \right] \\ C_v = (728 \pm 0,5) \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг град}} \right] \\ \mu = (28,9 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{кг}}{\text{моль}} \right] \\ \kappa = 1,40 \\ B = 288 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг град}} \right] \end{array} \right\} \text{ для воздуха}$$

3. Описание экспериментальной установки

Структурная схема установки представлена на рис. 3.1.

В состав **экспериментальной установки** входят:

Генератор электрических колебаний звуковой частоты 2,

Динамик-передатчик 1,

Динамик-приемник 4 ,

Осциллограф 3,

Потенциометр R,

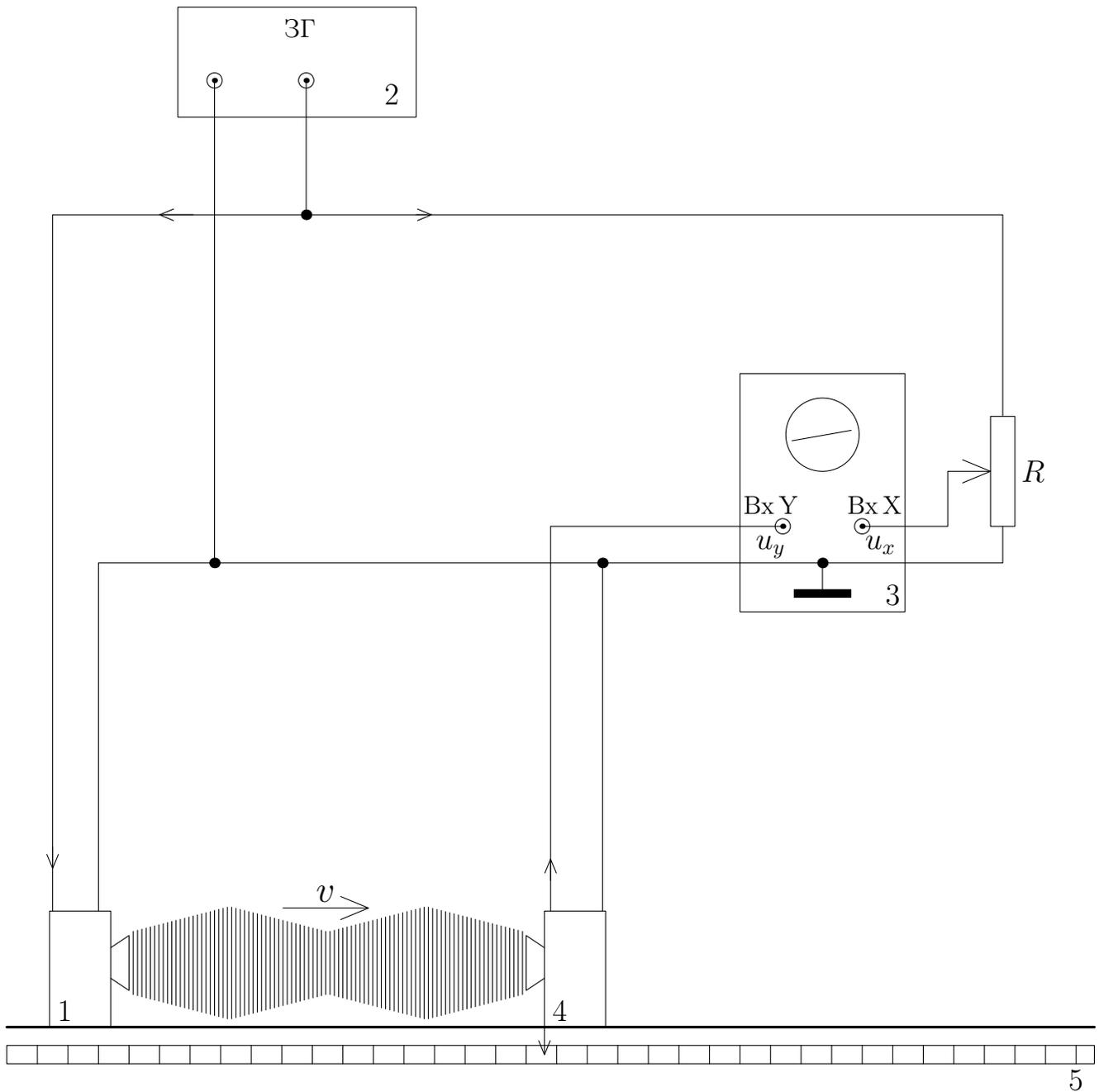


Рис. 3.1

Шкала расстояний 5.

Электрические колебания звуковой частоты поступают на звуковую катушку динамика-передатчика 1 и создают в ней электрический ток звуковой частоты. Катушка динамика механически связана с диффузором и находится в поле постоянного магнита. В результате взаимодействия тока в катушке с полем постоянного магнита диффузор совершает колебания вдоль своей оси и возбуждает звуковую

3. Описание экспериментальной установки

волну, распространяющуюся в направлении динамика-приемника 4, который по устройству не отличается от динамика-передатчика 1.

Под действием звуковой волны диффузор и связанная с ним звуковая катушка динамика-прёмника совершают механические колебания вдоль своей оси со звуковой частотой. При этом в звуковой катушке индуцируется электродвижущая сила индукции, которая подается на вход усилителя вертикального отклонения луча осциллографа (вход “У”).

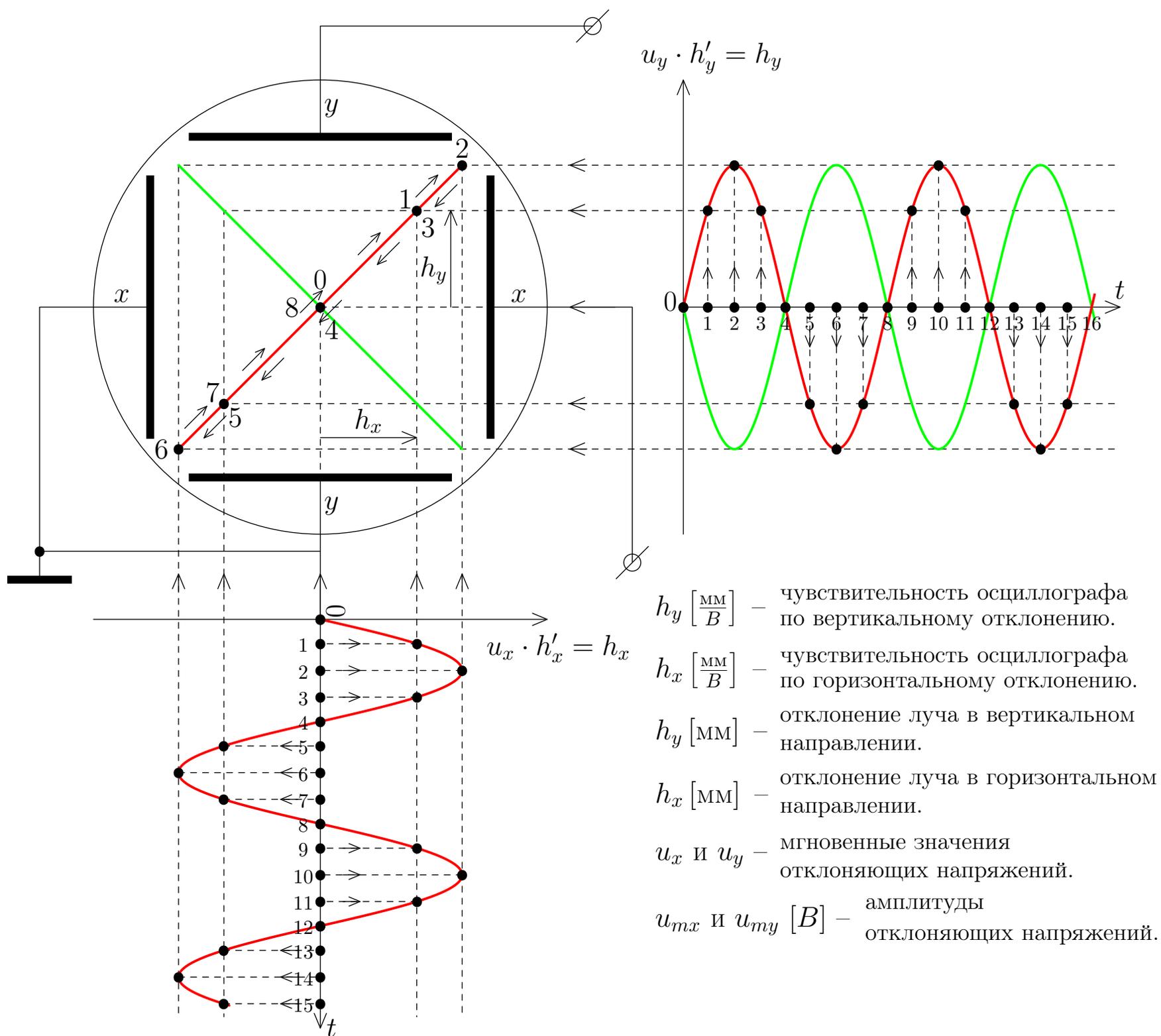
Таким образом, динамик-передатчик преобразует энергию электрических колебаний в энергию звуковых волн, а динамик-приемник, наоборот, преобразует энергию механических колебаний в энергию электрических колебаний той же звуковой частоты и формы. Однако, фазы колебаний в динамике-передатчике и динамике-приемнике отличаются друг от друга. Величина сдвига фаз зависит от расстояния между динамиками 1 и 4 и ее можно измерить с помощью осциллографа. Для этого на вход усилителя горизонтального отклонения луча осциллографа (вход “Х”) подается с потенциометра часть напряжения звуковой частоты, питающего звуковую катушку динамика-передатчика 1. Это напряжение называется **опорным. Его начальная фаза величина постоянная.** Именно с ней и сравнивается начальная фаза колебаний, вырабатываемых динамиком-приемником 4.

Принцип определения сдвига фаз двух гармонгармонических колебаний с помощью осциллографа, показанного на рис. 3.2.

Цифрами на графиках обозначены одинаковые моменты времени и соответствующее им смещение луча на экране. Например, для $t = t_3$ смещение луча по оси Y будет равно h_y , а по оси X — h_x . Положение луча на экране — точка 3. Стрелками показано направление перемещения луча на экране трубки с течением времени.

При отсутствии одного из отклоняющих напряжений луч вычерчивает на экране трубки либо вертикальную линию ($u_{mx} = 0$; $u_{my} \neq 0$), либо горизонтальную линию ($u_{mx} \neq 0$; $u_{my} = 0$). Если отсутствуют оба напряжения ($u_{mx} = 0$; $u_{my} = 0$), то луч находится в центре экрана.

Если $u_{mx} \neq 0$ и $u_{my} \neq 0$, а фазы их совпадают, то на экране трубки вычерчивается прямая линия с острым углом наклона к горизонтальной оси (α). Если же фазы колебаний противоположны, то угол наклона прямой линии становится тупым.



4. Задание и порядок его выполнения

В случае произвольного сдвига фаз на экране трубки вычерчивается эллипс.

Таким образом, перемещая динамик 4 относительно неподвижного динамика 1 можно определить координаты (Z) точек пространства, в которых колебания совпадают по фазе, измерить длину звуковой волны, и по ней определить скорость звуковых волн.

4. Задание и порядок его выполнения

1. Собрать схему исследования (рис. 3.1) и предъявить ее на проверку. Получить разрешение и включить лабораторную установку. Прогреть ее в течении 15-20 минут.
2. Измерить температуру воздуха в лаборатории и рассчитать скорость звуковых волн. Определить относительную и абсолютную погрешности результата расчета.
3. Выключить развертку осциллографа, установить частоту 3 Гц, подать на выход “У” сначала опорное напряжение, а потом, напряжение с выхода динамика-приемника. Убедиться в идентичности формы колебаний. Регулятором громкости динамика-передатчика изменять амплитуду звуковых волн и наблюдать аналогичное изменение амплитуды напряжения на выходе динамика-приемника. Убедиться, что перестройка звукового генератора приводит к соответствующему изменению частоты напряжения на выходе динамика-приемника. Выключить развертку осциллографа.
4. Измерить длину звуковой волны на частотах 700 Гц, 1000 Гц, 1300 Гц, 1500 Гц — каждое измерение проделать не менее 5-7 раз.

Результаты измерений записать в таблицу:

№ п/п	Частота (Гц)							
	700		1000		1300		1500	
	λ [м]	$\Delta\lambda$ [м]						
1.								
2.								
3.								
...								
Среднее								

5. Рассчитать скорость звуковых волн на всех, указанных в пункте 3 частотах, и определить погрешности измерений. Погрешность в установке частоты звукового генератора определять по формуле:

$$\Delta\nu = \pm(0,01\nu + 1) [\text{Гц}].$$

6. Построить график зависимости скорости звука от частоты генератора. На график нанести расчетное значение скорости звука и погрешности для каждого измеренного и рассчитанного значения. Сделать заключение о наличии или отсутствии дисперсии звуковых волн на основе экспериментальных и расчетных данных.

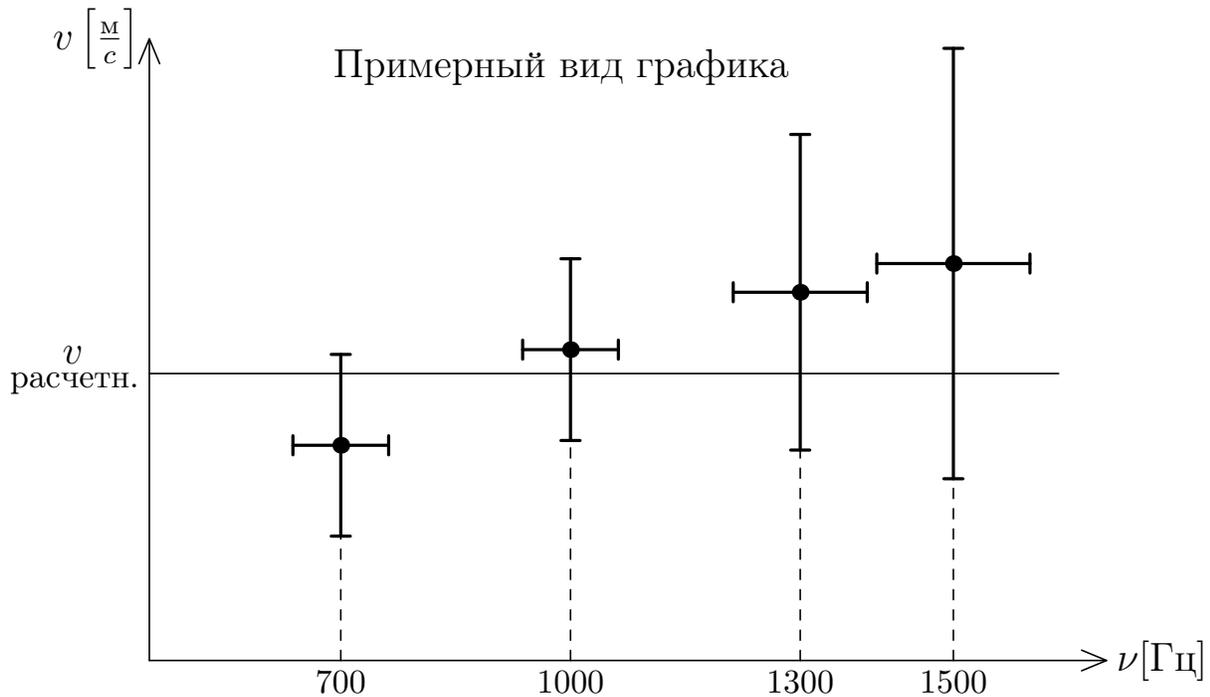


Рис. 4.1

5. Содержание отчета

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Структурная схема лабораторной установки.
3. Перечень используемых в работе измерительных приборов с указанием их типа, заводского номера и основных технических характеристик.
4. Результаты расчета скорости звука (пункты 2, 4).
5. Результаты измерений (таблица пункта 3).
6. График зависимости скорости звука от частоты.
7. Краткие выводы по результатам исследования.
8. Дата выполнения работы и подпись студента.