

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
“МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)”

Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий

**Отчёт по лабораторной работе № 2.1.3**  
**"Определение  $C_p/C_v$  по скорости звука в газе"**

Выполнил:  
Студент гр. Б01-305  
Миннахметов Артур

Долгопрудный, 2024

# 1 Введение

**Цель работы:** 1) измерение частоты колебаний и длины волны при резонансе звуковых колебаний в газе, заполняющем трубу; 2) определение показателя адиабаты с помощью уравнения состояния идеального газа.

**В работе используются:** звуковой генератор; электронный осциллограф; микрофон; телефон; раздвижная труба; теплоизолированная труба, обогреваемая водой из термостата; баллон со сжатым углекислым газом.

## 1.1 Теоритическая часть

Скорость распространения звуковой волны в газах зависит от показателя адиабаты  $\gamma$ . На измерении скорости звука основан один из наиболее точных методов определения показателя адиабаты.

Скорость звука в газах определяется формулой:

$$c = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}} \quad (1)$$

где  $R$  – газовая постоянная,  $T$  – температура газа, а  $\mu$  – его молярная масса. Преобразуя эту формулу, найдем

$$\gamma = \frac{\mu}{RT} c^2 \quad (2)$$

Таким образом, для определения показателя адиабаты достаточно измерить температуру газа и скорость распространения звука (молярная масса газа предполагается известной).

Звуковая волна, распространяющаяся вдоль трубы, испытывает многократные отражения от торцов. Звуковые колебания в трубе являются наложением всех отраженных волн и очень сложны. Картина упрощается, если длина трубы  $L$  равна целому числу полуволен, то есть когда

$$L = \frac{n\lambda}{2}$$

где  $\lambda$  – длина волны звука в трубе, а  $n$  – любое целое число. Если это условие выполнено, то волна, отраженная от торца трубы, вернувшись к ее началу и вновь отраженная, совпадает по фазе с падающей. Совпадающие по фазе волны усиливают друг друга. Амплитуда звуковых колебаний при этом резко возрастает – наступает резонанс.

При звуковых колебаниях слои газа, прилегающие к торцам трубы, не испытывают смещения. Узлы смещения повторяются по всей длине трубы через  $\lambda/2$ . Между узлами находятся максимумы смещения.

Скорость звука  $c$  связана с его частотой  $f$  и длиной волны  $\lambda$  соотношением

$$c = \lambda f \quad (3)$$

Подбор условий, при которых возникает резонанс, можно производить двояко:

1. При неизменной частоте  $f$  звукового генератора (а следовательно, и неизменной длине звуковой волны  $\lambda$ ) можно изменять длину трубы  $L$ . Для этого применяется раздвижная труба. Длина раздвижной трубы постепенно увеличивается, и наблюдается ряд последовательных резонансов. Возникновение резонанса легко наблюдать на осциллографе по резкому увеличению амплитуды колебаний. Для последовательных резонансов имеем

$$L_n = n \frac{\lambda}{2}, \quad L_{n+1} = (n+1) \frac{\lambda}{2}, \quad \dots, \quad L_{n+k} = n \frac{\lambda}{2} + k \frac{\lambda}{2}, \quad (4)$$

т. е.  $\lambda/2$  равно угловому коэффициенту графика, изображающего зависимость длины трубы  $L$  от номера резонанса  $k$ . Скорость звука находится по формуле (3).

2. При постоянной длине трубы можно изменять частоту звуковых колебаний. В этом случае следует плавно изменять частоту  $f$  звукового генератора, а следовательно, и длину звуковой волны  $\lambda$ . Для последовательных резонансов получим

$$L = \frac{\lambda_1}{2} n = \frac{\lambda_2}{2} (n+1) = \dots = \frac{\lambda_{k+1}}{2} (n+k). \quad (5)$$

Из (3) и (5) имеем:

$$f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{c}{2L} n, \quad f_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{c}{2L} (n+1) = f_1 + \frac{c}{2L}, \quad \dots, \\ f_{k+1} = \frac{c}{\lambda_{k+1}} = \frac{c}{2L} (n+k) = f_1 + \frac{c}{2L} k. \quad (6)$$

Скорость звука, деленная на  $2L$ , определяется, таким образом, по угловому коэффициенту графика зависимости частоты от номера резонанса.

## 1.2 Экспериментальная установка

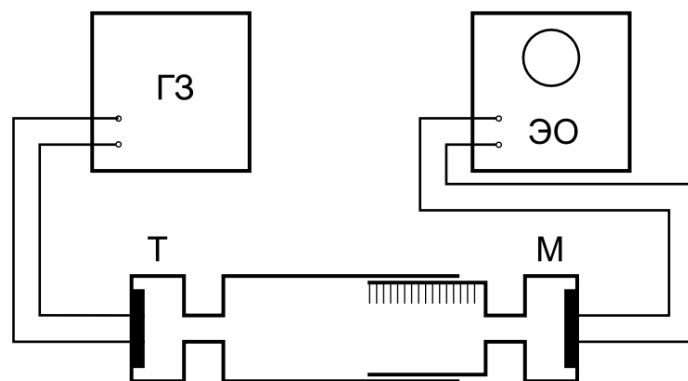


Рис. 1: Установка для измерения скорости звука при помощи раздвижной трубы

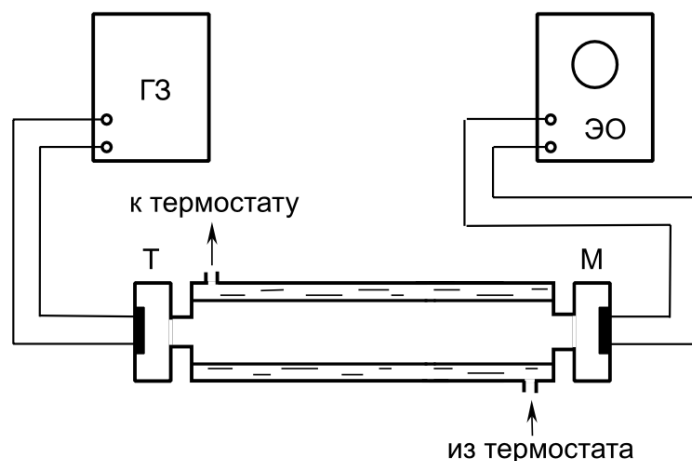


Рис. 2: Установка для изучения зависимости скорости звука от температуры

Соответственно двум методам измерения скорости звука в работе имеются две установки (рис. 1 и 2). В обеих установках звуковые колебания в трубе возбуждаются телефоном Т и улавливаются микрофоном М. Мембрана телефона приводится в движение переменным током звуковой частоты; в качестве источника переменной ЭДС используется звуковой генератор ГЗ. Возникающий в микрофоне сигнал наблюдается на осциллографе ЭО.

Микрофон и телефон присоединены к установке через тонкие резиновые трубки. Такая связь достаточна для возбуждения и обнаружения звуковых колебаний в трубе и в то же время мало возмущает эти колебания: при расчетах оба торца трубы можно считать неподвижными, а влиянием соединительных отверстий пренебречь.

Первая установка (рис. 1) содержит раздвижную трубу с миллиметровой шкалой. Через патрубок (на рисунке не показан) труба может наполняться воздухом или углекислым газом из газгольдера. На этой установке производятся измерения  $\gamma$  для воздуха и для  $CO_2$ . Вторая установка (рис. 2) содержит теплоизолированную трубу постоянной длины. Воздух в трубе нагревается водой из термостата. Температура газа принимается равной температуре омывающей трубу воды. На этой установке измеряется зависимость скорости звука от температуры.

## 2 Ход работы

### 2.1 Измерения

1. Некоторые данные:

$$L_1 = (570 \pm 5) \text{ мм} - \text{начальная длина трубы,}$$

$$T = 296 \text{ К} - \text{температура в комнате,}$$

$$L_2 = (800 \pm 1) \text{ мм} - \text{длина трубы для 2 измерения.}$$

2. Для начала измерена зависимость длины трубы от возникновения резонанса

3. Также измерена зависимость резонансной частоты от температуры при постоянной длине трубы.

| Частота, Гц | Длина, мм | Длина, мм | Длина, мм | Длина, мм | Длина, мм |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2280        | 45        | 124       | 198       |           |           |
| 2600        | 40        | 109       | 171       |           |           |
| 2900        | 32        | 91        | 149       | 210       |           |
| 3200        | 39        | 94        | 146       | 202       |           |
| 3500        | 30        | 81        | 130       | 180       | 230       |
| 2000        | 43        | 128       | 217       |           |           |

Таблица 1: Измерения для воздуха

| Частота, Гц | Длина, мм | Длина, мм | Длина, мм | Длина, мм | Длина, мм |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2000        | 180       | 113       | 45        |           |           |
| 2300        | 196       | 138       | 80        | 20        |           |
| 2600        | 212       | 164       | 110       | 600       | 6         |
| 2900        | 185       | 139       | 94        | 45        |           |
| 3200        | 200       | 154       | 112       | 70        | 30        |

Таблица 2: Измерения для углекислого газа

## 2.2 Обработка

4. Для воздуха построим график  $L$ . Уравнения:

$$\Delta L(k) = 76.5k \text{ для } \nu = 2280\text{Гц},$$

$$\Delta L(k) = 65.5k \text{ для } \nu = 2600\text{Гц},$$

$$\Delta L(k) = 59.2k \text{ для } \nu = 2900\text{Гц},$$

$$\Delta L(k) = 54.1k \text{ для } \nu = 3200\text{Гц},$$

$$\Delta L(k) = 49.9k \text{ для } \nu = 3500\text{Гц},$$

$$\Delta L(k) = 87k \text{ для } \nu = 2000\text{Гц}.$$

5. Для углекислого газа построим графики. Уравнения:

$$\Delta L(k) = 67.5k \text{ для } \nu = 2000\text{Гц},$$

$$\Delta L(k) = 58.6k \text{ для } \nu = 2300\text{Гц},$$

$$\Delta L(k) = 51.6k \text{ для } \nu = 2600\text{Гц},$$

$$\Delta L(k) = 46.5k \text{ для } \nu = 2900\text{Гц},$$

$$\Delta L(k) = 42.4k \text{ для } \nu = 3200\text{Гц}.$$

6. Значение скорости звука в воздухе получилось  $(346 \pm 1)$  м/с. А для углекислого газа  $(270 \pm 1)$  м/с.

7. Анализ измерений на второй установке тоже сводится к построению графика. Уравнения:

$$\Delta \nu(k) = 220k \text{ для } T = 27^\circ\text{C},$$

$$\Delta \nu(k) = 222.7k \text{ для } T = 35^\circ\text{C},$$

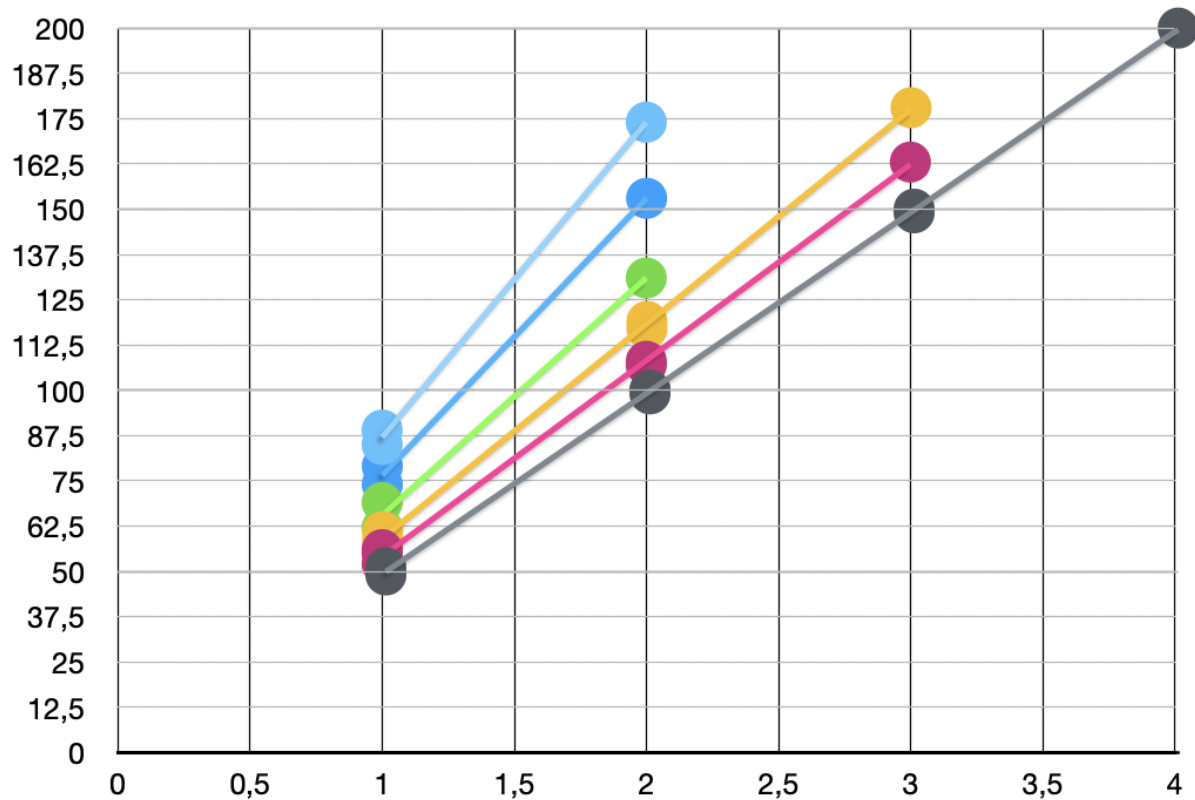


Рис. 3: Зависимость  $\Delta L(k)$  для воздуха

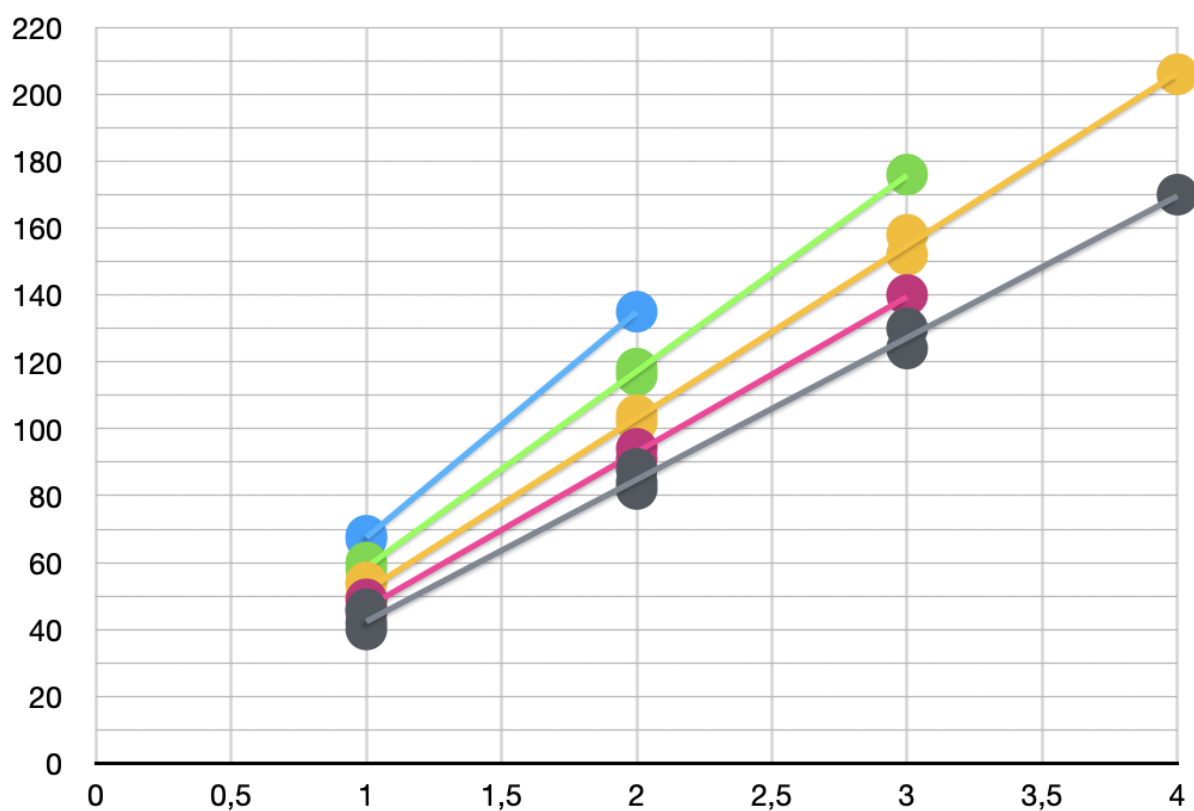


Рис. 4: Зависимость  $\Delta L(k)$  для углекислого газа

| Температура, °C | Частота, Гц | Частота, Гц | Частота, Гц | Частота, Гц | Частота, Гц | Частота, Гц |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 27              | 203.8       | 452.5       | 664.3       | 879         | 1095.5      | 1314        |
| 35              | 205         | 459         | 671         | 890         | 1110        | 1330        |
| 45              | 209         | 464         | 683         | 903         | 1127        | 1351        |
| 55              | 211         | 471         | 693         | 917         | 1144        | 1372        |

Таблица 3: Измерения зависимости от температуры.

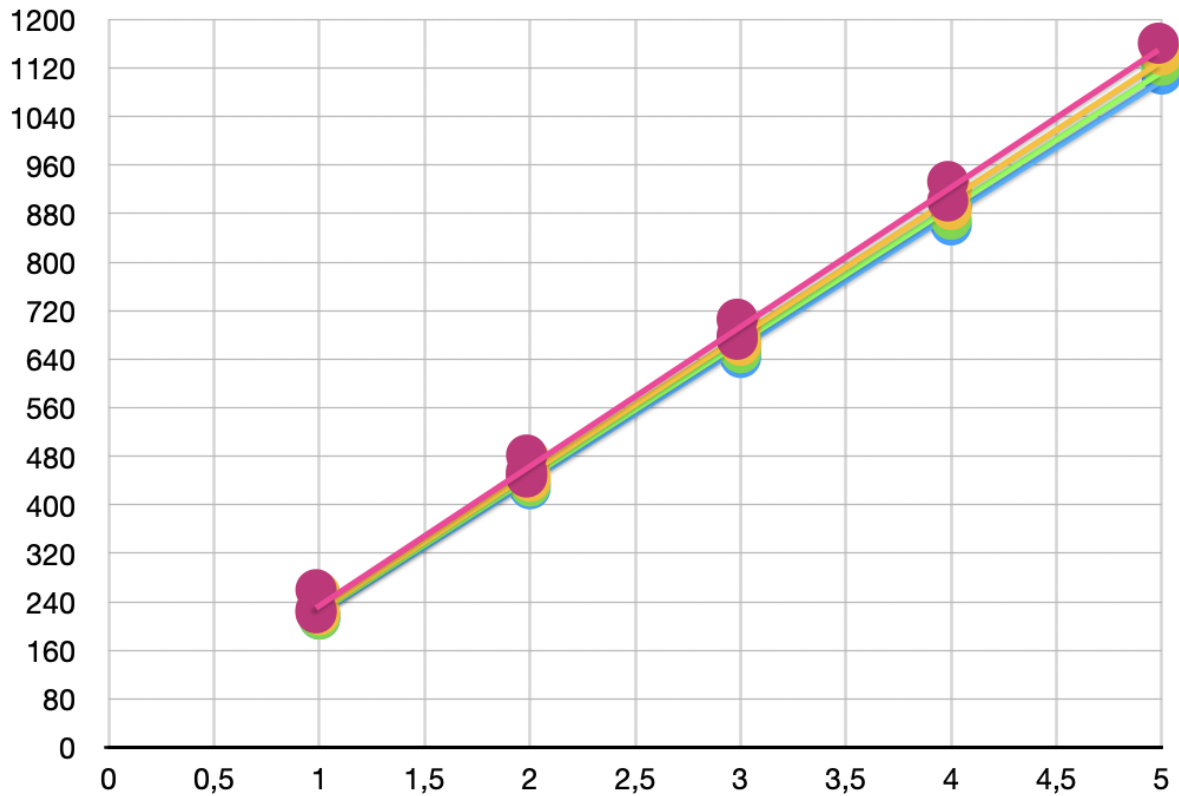


Рис. 5: Зависимость  $\Delta\nu(k)$  для воздуха

$$\Delta\nu(k) = 226k \text{ для } T = 45^\circ\text{C},$$

$$\Delta\nu(k) = 230k \text{ для } T = 55^\circ\text{C}.$$

Заметим, что при повышении температуры график вращается против часовой стрелки.

8. По графику из пункта 7 определены  $\frac{c}{2L_2} = (224.7 \pm 3)\text{Гц}$ . Таким образом  $c = 360 \pm 4 \text{ м/с}$ .

9. Для воздуха  $\gamma = (1.45 \pm 0.05)$ , для углекислого газа  $\gamma = 1.29 \pm 0.02$ .

### 3 Выводы

Измерена скорость звука в воздухе, а также в углекислом газе. Они оказались равны  $(353 \pm 3) \text{ м/с}$  и  $(270 \pm 1) \text{ м/с}$  соответственно. Также измерено отношение  $C_p/C_V$ , которые оказались равны  $(1.45 \pm 0.05)$  и  $1.29 \pm 0.02$  соответственно. Эти результаты сходятся с табличными данными, поэтому работу можно считать с хорошей точностью правильной.