

# Отчёт по лабораторной работе 2.1.1.

## Определение $C_p/C_v$ по скорости звука.

Работу выполнил Громов Артём  
ЛФИ Б02-006

Долгопрудный, 2021 г.

# 1. Аннотация

## 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 ГЗ; электронный осциллограф ЭО; микрофон; телефон; раздвижная труба; теплоизолированная труба, обогреваемая водой из термостата; баллон со сжатым углекислым газом; газгольдер.

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 формулу, найдём

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

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 отражённых волн и, вообще говоря, очень сложны. Картина упрощается, если длина трубы равна целому числу полуволен, то есть когда

$$L = n \frac{\lambda}{2}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  — длина волны звука в трубе, а  $n$  — любое целое число. Если условие (2) выполнено, то волна, отражённая от торца трубы, вернувшись к её началу и вновь отражённая, совпадает по фазе с падающей. Совпадающие по фазе волны усиливают друг друга. Амплитуда звуковых колебаний при этом резко возрастает.

При звуковых колебаниях слои газа, прилегающие к торцам трубы, на испытывают смещения (*узел смещения*). Узлы смещения находятся максимум смещения (*пучности*).

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

$$c = \lambda f. \quad (4)$$

Подбор условий, при которых возникает резонанс, будем производить, изменяя частоту звуковых колебаний при постоянной длине трубы. 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 (4) и (5) имеем

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

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

## 2. Экспериментальная установка

В установке (рис. 1) 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 достаточно для возбуждения и обнаружения звуковых колебаний в трубе и в то же время мало возмущает эти колебания: при расчётах оба торца можно считать неподвижными, а влиянием соединительных отверстий пренебречь.

Установка содержит теплоизолированную трубу постоянной длины ( $L = 800 \pm 1$  мм). Воздух в трубе нагревается водой из термостата. Температура газа принимается равной температуре воды, омывающей трубу. На данной установке определяется зависимость скорости звука от температуры.

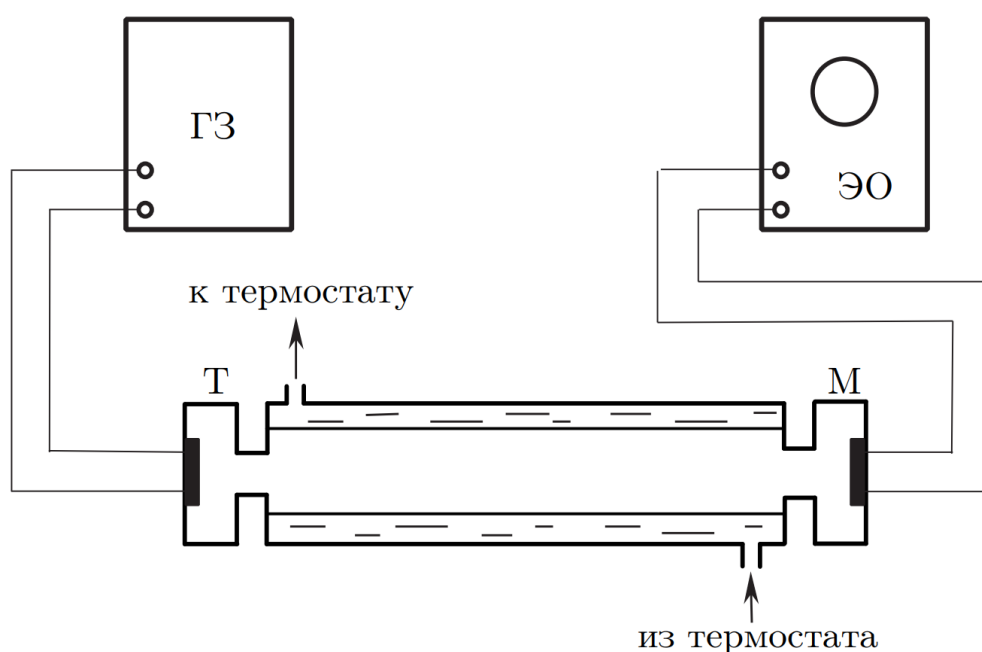


Рис. 1: Установка для изучения зависимости скорости звука от температуры

## 3. Результаты измерений и обработка данных

### 3.1. Определение резонансных частот

Измерим скорость звука в трубе. Для этого будем плавно менять частоту на звуковом генераторе отлавливая резкое увеличение амплитуды с помощью осциллографа. Чтобы улучшить точность будем проводить две серии опытов: сначала увеличивая частоту, а затем уменьшая. Погрешность измерения частоты составила  $\Delta_{\text{ген}} = \pm 1$ , Гц. Занесём полученные данные в таблицу 1.

Таблица 1.

Значения резонансных частот

$T = 27^\circ\text{C}$							
$k$	0	1	2	3	4	5	6

$f^+, \Gamma_{\Pi}$	449	663	880	1096	1315	1535	1750
$f^-, \Gamma_{\Pi}$	450	661	881	1098	1313	1535	1751
$f_{\text{ср}}, \Gamma_{\Pi}$	449.5	662.0	880.5	1097.0	1314.0	1535.0	1751.5
$\sigma_{\text{сл}}$	0.5	1	0.5	1	1	0	0.5
$\sigma_{\text{пол}}$	1.1	1.4	1.1	1.4	1.4	1.0	1.1
$f_{k+1} - f_1, \Gamma_{\Pi}$	0.0	212.5	431.0	647.5	864.5	1085.5	1301.0
$T = 35^\circ \text{C}$							
$k$	0	1	2	3	4	5	6
$f^+, \Gamma_{\Pi}$	456	672	888	1107	1326	1550	1772
$f^-, \Gamma_{\Pi}$	457	671	888	1106	1327	1549	1774
$f_{\text{ср}}, \Gamma_{\Pi}$	456.5	671.5	888	1106.5	1326.5	1549.5	1773.0
$\sigma_{\text{сл}}$	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0.5	1
$\sigma_{\text{пол}}$	1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.4
$f_{k+1} - f_1, \Gamma_{\Pi}$	0.0	215.0	431.5	650.0	870.0	1093.0	1316.5
$T = 45^\circ \text{C}$							
$k$	0	1	2	3	4	5	6
$f^+, \Gamma_{\Pi}$	462	685	904	1127	1352	1575	1800
$f^-, \Gamma_{\Pi}$	463	684	902	1128	1352	1576	1801
$f_{\text{ср}}, \Gamma_{\Pi}$	462.5	684.5	903.0	1127.5	1352.0	1575.5	1800.5
$\sigma_{\text{сл}}$	0.5	0.5	1	0.5	0	0.5	0.5
$\sigma_{\text{пол}}$	1.1	1.1	1.4	1.1	1.0	1.1	1.1
$f_{k+1} - f_1, \Gamma_{\Pi}$	0.0	222.0	440.5	665.0	889.5	1113.0	1338
$T = 55^\circ \text{C}$							
$k$	0	1	2	3	4	5	6
$f^+, \Gamma_{\Pi}$	468	693	920	1145	1372	1600	1827
$f^-, \Gamma_{\Pi}$	469	693	922	1144	1373	1599	1826
$f_{\text{ср}}, \Gamma_{\Pi}$	468.5	693.0	921.0	1144.5	1372.5	1599.5	1826.5
$\sigma_{\text{сл}}$	0.5	0	1	0.5	0.5	0.5	0.5
$\sigma_{\text{пол}}$	1.1	1.0	1.4	1.1	1.1	1.1	1.1
$f_{k+1} - f_1, \Gamma_{\Pi}$	0.0	224.5	452.5	676.0	904.0	1131.0	1358.0

Случайная и полная погрешности были оценены по формулам

$$\sigma_{\text{сл}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum (f_i - f_{\text{ср}})^2}, \quad \sigma_{\text{пол}} = \sqrt{\sigma_{\text{сл}}^2 + \Delta_{\text{ген}}^2} \quad (7)$$

### 3.2. Определение скорости звука и $C_p/C_v$ при разных температурах

Полученные результаты изобразим на графике, откладывая по оси абсцисс номер резонанса  $k$ , а по оси ординат — разность между частотой последующих резонансов и частотой первого резонанса:  $f_{k+1} - f_1$ . Через полученные точки проведём наилучшую прямую, используя метод наименьших квадратов (формула (8)). Угловый коэффициент прямой определяет величину  $c/2L$  (см. формулу (6)). Вычислите значения скорости звука при разных температурах. Погрешности вычислений оценим по формуле (9). Результаты изобразим на рис. 2.

$$k = \frac{\langle xy \rangle}{\langle x^2 \rangle} \quad (8)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle}{\langle x^2 \rangle} - k^2} \quad (9)$$

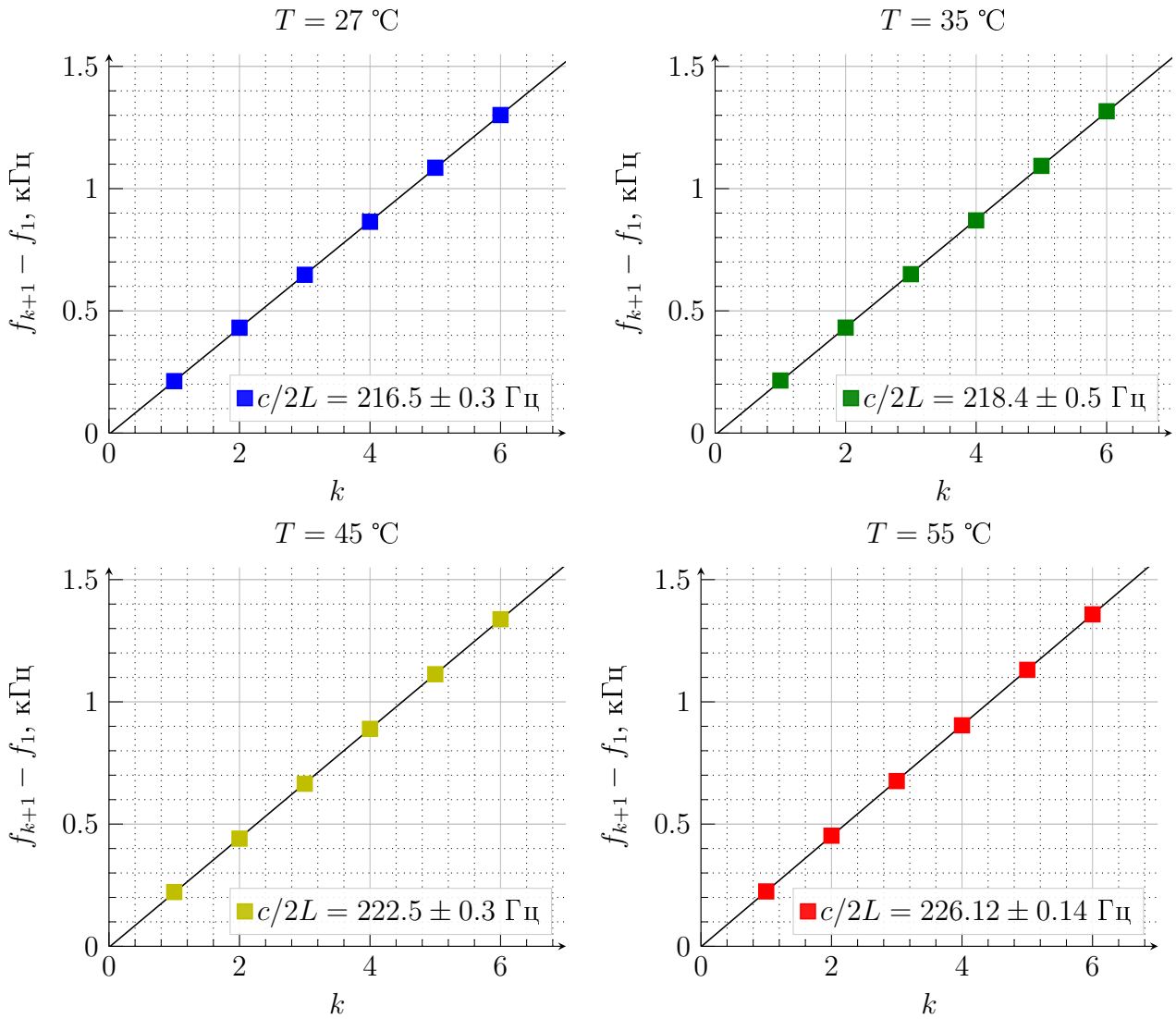


Рис. 2: Графики зависимости  $f_{k+1} - f_1$  от  $k$  при разных температурах

Вычислим теперь скорость звука и отношение  $C_p/C_v$ . Примем молярную массу воздуха равной  $\mu = 0.029$  кг/моль. Результаты вычислений занесём в таблицу 2.

**Таблица 2.**

Значения резонансных частот

$T, ^\circ\text{C}$	27	35	45	55
$c, \text{ м/с}$	$346.5 \pm 0.4$	$349.4 \pm 0.7$	$356.0 \pm 0.4$	$361.8 \pm 0.2$
$C_p/C_v$	$1.396 \pm 0.003$	$1.383 \pm 0.006$	$1.390 \pm 0.003$	$1.392 \pm 0.002$

Погрешность определения  $C_p/C_v$  определяется по формуле

$$\sigma_{C_p/C_v} = C_p/C_v \cdot 2\mathcal{E}_c \quad (10)$$

## 4. Обсуждение результатов

В данной лабораторной работе мы исследовали величину скорости звука в воздухе и определяли отношение  $C_p/C_v$ . Проведенные нами измерения были очень точными (погрешность составляла порядка 0.1%). Погрешности величин, измеряемых косвенным методом, обладают тем же порядком. Все полученные результаты с хорошей точностью согласуются с табличными значениями. Главным источником неточностей может быть звуко́й генератор, так как он довольно сложен в использовании и некоторые измерения производились с большим трудом.

## 5. Вывод

Все цели работы выполнены и достигнуты ожидаемые результаты. Единственным улучшением в работе может стать обновление звуко́го генератора. Дальнейшим развитием работы может стать определение  $\gamma$  при более высоких температурах и наблюдение активации дополнительных степеней свободы.