

Лабораторная работа 2.1.3
Определение C_p/C_v по скорости звука в газе

Струков Олег
Б04-404

Введение

Цель работы:

1. Измерить частоту колебаний и длины волн при резонансе звуковых колебаний в газе, заполняющем трубу;
2. Определить показатель адиабаты с помощью уравнения состояния идеального газа.

Оборудование: звуковой генератор; электронный осциллограф; микрофон; телефон; раздвижная труба; теплоизолированная труба, обогреваемая водой из термостата; баллон со сжатым углекислым газом; газгольдер.

Теоретические сведения

Скорость распространения звуковой волны в газах зависит от показателя адиабаты γ . 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 μ – его молярная масса. Преобразуя эту формулу, получаем

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

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 полуволн, то есть когда

$$L = n\lambda/2,$$

где λ – длина волны звука в трубе, а n – любое натуральное число. Если это условие выполнено, то волна, отражённая от торца трубы, вернувшаяся 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 – 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 с связана с его частотой f и длиной волны λ соотношением

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

Подбор условий, при которых возникает резонанс, можно производить двумя способами:

1. При неизменной частоте f звукового генератора (а следовательно, и неизменной длине звуковой волны λ) 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).

- 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 λ . 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:

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

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

Экспериментальная установка

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 расчётах 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 γ 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.

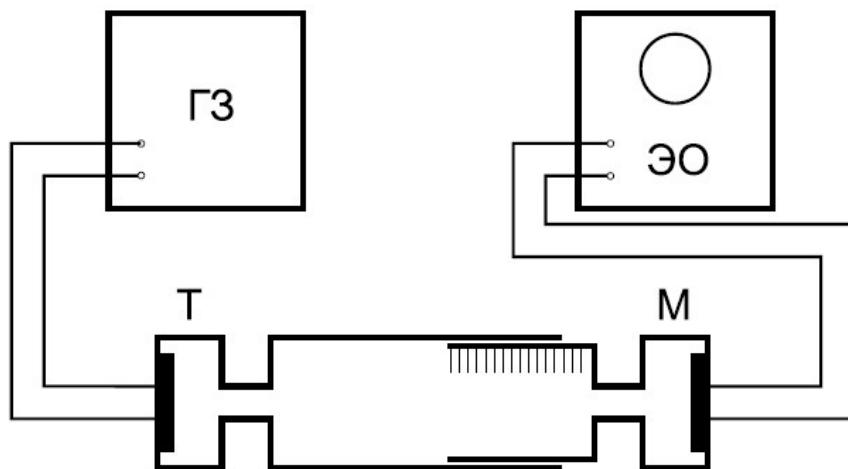


Рис. 1: Установка для измерения скорости звука при помощи раздвижной трубы

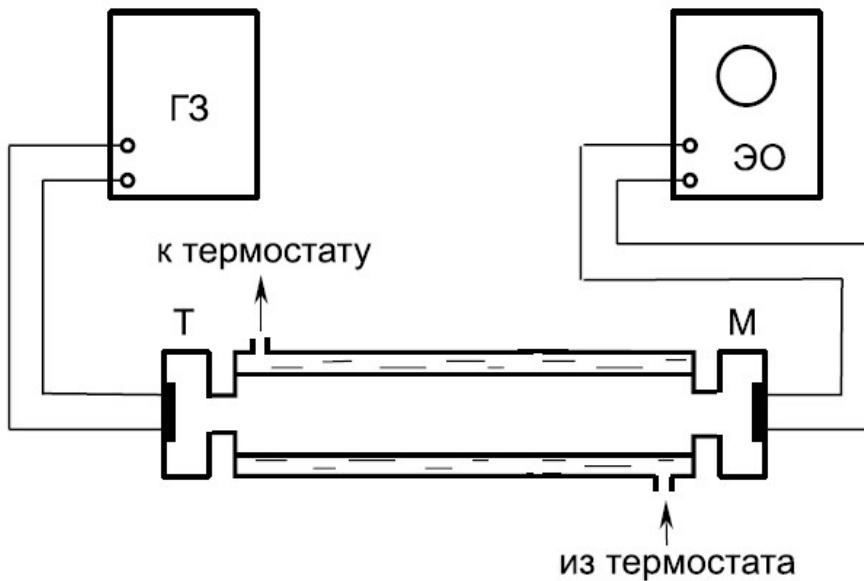


Рис. 2: Установка для изучения зависимости скорости звука от температуры

Ход работы

Измерение скорости звука в воздухе и CO₂ при различной длине трубы и постоянной температуре

1. В первую очередь были проведены измерения коэффициента C_p/C_v для воздуха при помощи установки с раздвижной трубой. При фиксированной частоте звукового сигнала длина трубы постепенно уменьшалась до момента достижения резонанса. При его возникновении фиксировались расстояние, на которое была выдвинута трубка прибора, и номер резонанса k . Данные измерения были проведены для четырёх различных значений частоты f с трубой, сначала заполненной воздухом, а потом – CO₂. Комнатная температура при этом составляла $t_k = 24,5 {}^{\circ}\text{C}$. Результаты представлены в таблице:

f, Гц	Воздух				CO ₂			
	ΔL , см							
k	2548	3421	4263	5089	2493	2745	3010	3268
1	4,2	3,3	4,7	4,7	5,1	5,9	0,9	1,0
2	10,9	8,4	8,8	8,1	11,2	10,5	6,2	5,5
3	17,6	13,3	12,9	11,5	17,4	15,8	11,5	9,7
4		18,4	16,9	14,8		20,6	17,2	13,9
5			21	18,2			22,5	18,8

2. По результатам проведённых измерений были построены графики для различных частот, где по оси абсцисс отложены номера последовательных резонансов, а по оси ординат – соответствующие удлинения трубы ΔL .

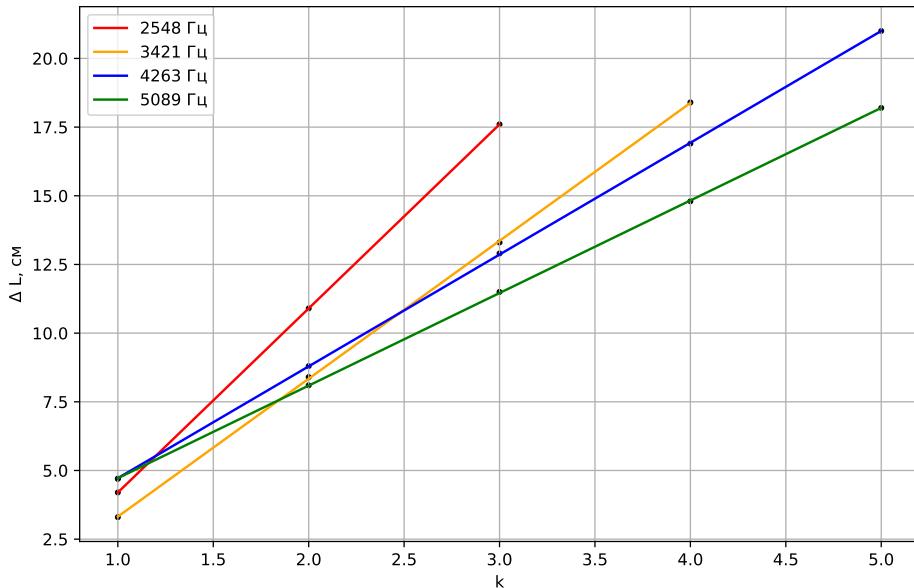


Рис. 3: Труба заполнена воздухом

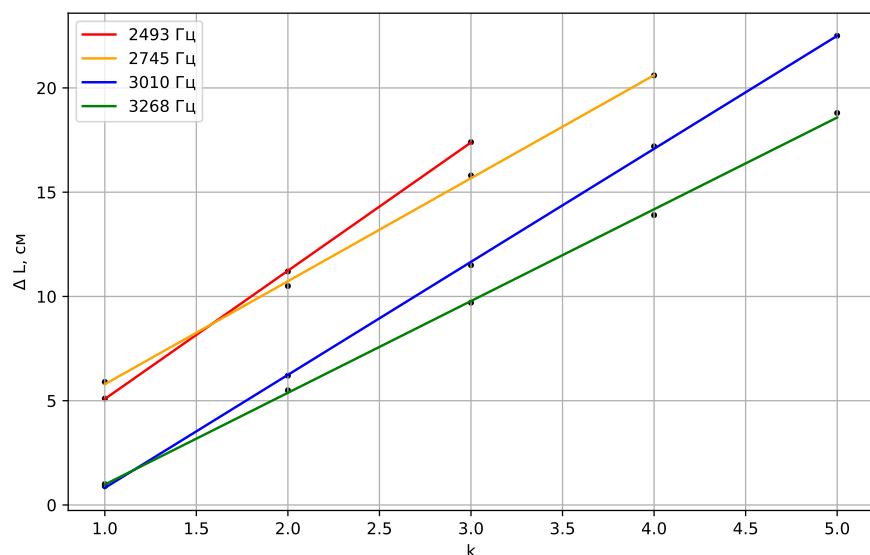


Рис. 4: Труба заполнена CO_2

3. Угловые коэффициенты полученных прямых равны длинам полуволн. Таким образом, с их помощью были вычислены скорости звука для всех частот. Результаты приведены в таблице:

Воздух			CO_2		
f , Гц	$\lambda/2$, см	c , м/с	f , Гц	$\lambda/2$, см	c , м/с
2548	6,7	341,43	2493	6,15	306,64
3421	5,02	343,47	2745	5,14	282,19
4263	4,07	347,01	3010	4,82	290,16
5089	3,37	342,99	3268	4,40	287,58

4. Средняя скорость звука по полученным данным в воздухе составляет $c_{возд} = 343,73$ м/с, а в углекислом газе – $c_{CO_2} = 291,64$ м/с, что довольно близко к табличным значениям $c_{возд}^{табл} = 346$ м/с, $c_{CO_2}^{табл} = 282$ м/с.

Измерение скорости звука в воздухе и CO₂ при постоянной длине трубы и постоянной температуре

1. Для нахождения скорости звука данным способом был получен ряд последовательных резонансных значений частоты при нескольких различных длинах для обоих газов. Результаты измерений представлены в таблицах:

Воздух											
L, м	0,72		0,715		0,71		0,705		0,7		
k	f, Гц	f _k - f ₁ , Гц	f, Гц	f _k - f ₁ , Гц	f, Гц	f _k - f ₁ , Гц	f, Гц	f _k - f ₁ , Гц	f, Гц	f _k - f ₁ , Гц	
1	220	0	228	0	237	0	245	0	254	0	
2	485	265	377	149	403	166	435	190	474	220	
3	774	554	801	573	833	596	718	473	755	501	
4	1166	946	993	765	1075	838	878	633	944	690	
5	1345	1125	1243	1015	1310	1073	1169	924	1258	1004	
6	1507	1287	1393	1165	1476	1239	1361	1116	1433	1179	
7	1757	1537	1621	1393	1759	1522	1601	1356	1758	1504	
8	2112	1892	2035	1807	1961	1724	1890	1645	1983	1729	
9	2334	2114	2257	2029	2167	1930	2069	1824	2236	1982	
10	2502	2282	2458	2230	2406	2169	2337	2092	2477	2223	
11	2689	2469	2638	2410	2583	2346	2531	2286	2709	2455	
12	2899	2679	2864	2636	2823	2586	2775	2530	2966	2712	

Углекислый газ						
L, м	0,72		0,71		0,7	
k	f, Гц	f _k - f ₁ , Гц	f, Гц	f _k - f ₁ , Гц	f, Гц	f _k - f ₁ , Гц
1	171	0	185	0	199	0
2	276	105	314	129	370	171
3	455	284	524	339	590	391
4	602	431	647	462	735	536
5	719	548	834	649	984	785
6	906	735	1021	836	1118	919
7	1042	871	1154	969	1371	1172
8	1173	1002	1368	1183	1543	1344
9	1364	1193	1527	1342	1745	1546
10	1511	1340	1686	1501	1935	1736
11	1640	1469	1875	1690	2116	1917
12	1815	1644	2015	1830	2319	2120

2. Полученные значения были изображены на графиках и по ним проведены наилучшие прямые зависимости $(f_k - f_1)(k)$

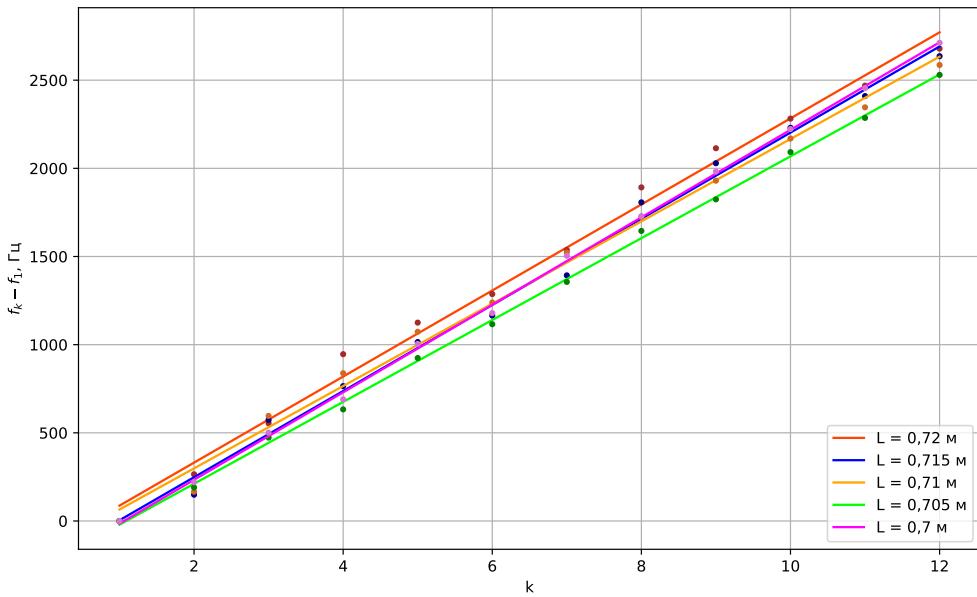


Рис. 5: Труба заполнена воздухом

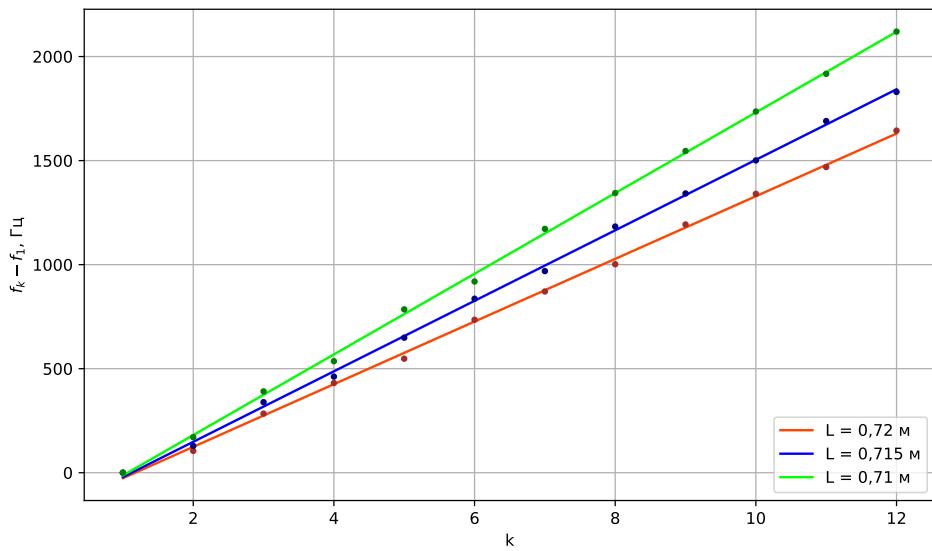


Рис. 6: Труба заполнена CO₂

3. Угловые коэффициенты полученных прямых определяют величину $c/2L$, из которой можно найти скорость звука в газе:

L, м	Воздух					CO ₂		
	0,72	0,715	0,71	0,705	0,7	0,72	0,71	0,7
c/2L, 1/c	240,88	244,29	233,47	235,12	248,12	170,56	179,40	193,81
c, м/с	346,87	349,34	331,53	331,51	347,36	245,60	254,75	271,33

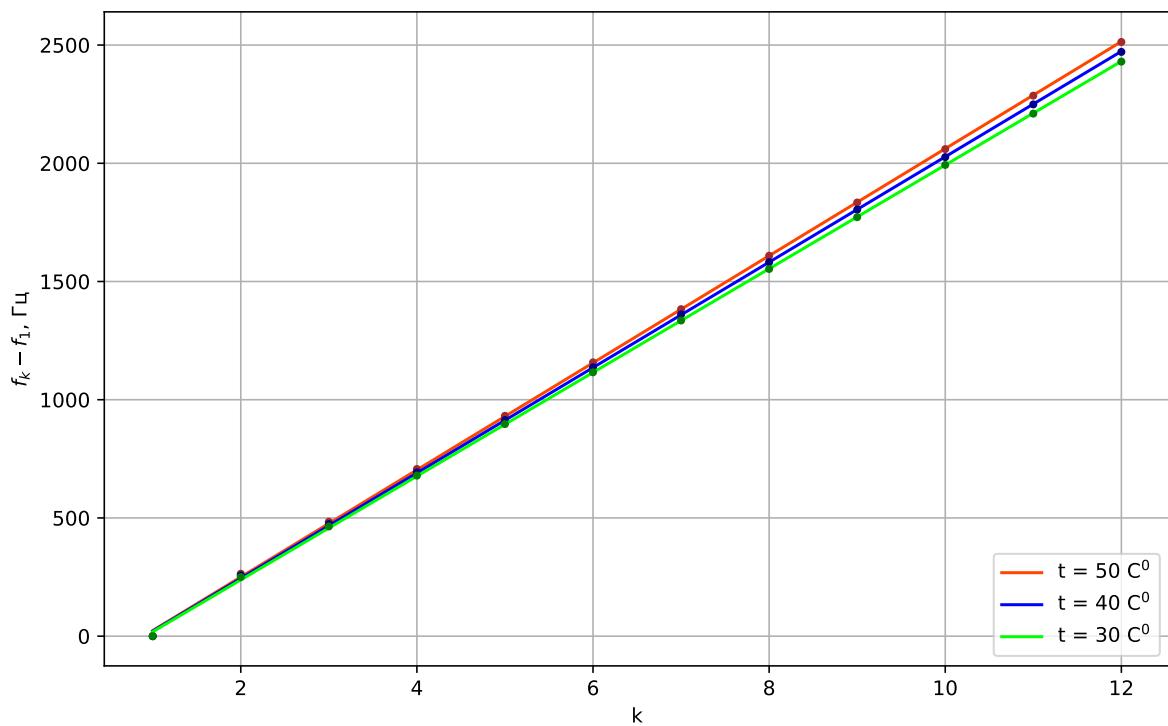
4. Согласно полученным данным, средняя скорость звука в воздухе $c_{возд} = 341,32$ м/с, в углекислом газе – $c_{CO_2} = 257,23$ м/с.

Измерение скорости звука в воздухе и CO₂ при постоянной длине трубы и различных температурах

1. На данном этапе эксперимента искались значения резонансных частот на установке с трубой, заполненной воздухом, и с термостатом при постоянной длине L = 0,8 м для трёх различных температур. Результаты измерений представлены в таблице:

t, °C	50		40		30	
	k	f, Гц	f _k - f ₁ , Гц	f, Гц	f _k - f ₁ , Гц	f, Гц
1	204	0	204	0	204	0
2	468	264	461	257	454	250
3	688	484	678	474	668	464
4	911	707	897	693	883	679
5	1136	932	1118	914	1101	897
6	1362	1158	1341	1137	1320	1116
7	1587	1383	1565	1361	1539	1335
8	1813	1609	1786	1582	1757	1553
9	2038	1834	2008	1804	1976	1772
10	2264	2060	2230	2026	2197	1993
11	2490	2286	2453	2249	2414	2210
12	2717	2513	2675	2471	2634	2430

2. Наилучшие прямые, проведённые по полученным значениям, изображены на графике:



3. Из угловых коэффициентов прямых, равных $c/2L$, были найдены скорости звука в воздухе при трёх различных температурах. Из полученных данных видно, что скорость звука в воздухе возрастает с увеличением температуры:

$t, {}^{\circ}\text{C}$	50	40	30
$c/2L, 1/\text{с}$	226,45	222,92	219,32
$c, \text{ м/с}$	362,32	356,68	350,91

Вычисление C_p/C_v

По полученным в трёх опытах значениям скорости звука с помощью формулы (2) было вычислено отношение $C_p/C_v = \gamma$ для воздуха и углекислого газа:

1. Первый опыт: для воздуха $\gamma_{\text{в}} = 1,385$, для углекислого газа $\gamma_y = 1,513$
2. Второй опыт: $\gamma_{\text{в}} = 1,365$, $\gamma_y = 1,177$
3. Третий опыт: при температуре $t = 30^{\circ}\text{C} - \gamma_{30} = 1,417$, при $t = 40^{\circ}\text{C} - \gamma_{40} = 1,417$, при $t = 50^{\circ}\text{C} - \gamma_{50} = 1,408$.

Табличные значения составляют $\gamma_{\text{в}}^{\text{табл}} = 1,40$, $\gamma_y^{\text{табл}} = 1,30$.

Вывод

В ходе работы была определена скорость звука в углекислом газе и воздухе при различных температурах, а также их C_p/C_v . При комнатной температуре средние значения в первом опыте составили $c_{\text{возд}} = 343,73 \text{ м/с}$, $c_{CO_2} = 291,64 \text{ м/с}$; во втором – $c_{\text{возд}} = 341,32 \text{ м/с}$, $c_{CO_2} = 257,23 \text{ м/с}$; в третьем – при температуре $t = 30^{\circ}\text{C} - c_{30} = 350,91 \text{ м/с}$, при $t = 40^{\circ}\text{C} - c_{40} = 356,68 \text{ м/с}$, при $t = 50^{\circ}\text{C} - c_{50} = 362,32 \text{ м/с}$.

Данные результаты достаточно близки к табличным значениям: при комнатной температуре $c_{\text{возд}}^{\text{табл}} = 346 \text{ м/с}$, $c_{CO_2}^{\text{табл}} = 282 \text{ м/с}$; при повышении температуры для воздуха $c_{30}^{\text{табл}} = 349,67 \text{ м/с}$, $c_{40}^{\text{табл}} = 355,74 \text{ м/с}$, $c_{50}^{\text{табл}} = 361,81 \text{ м/с}$.

Рассчитанные выше C_p/C_v для обоих газов также не сильно отличаются от указанных в справочнике.

Наибольшие отклонения от табличных значений присутствуют в скорости звука в углекислом газе, что могло быть вызвано не очень качественной прокачкой трубы после выполнения опытов с воздухом или попаданием в неё воздуха по каким-либо другим причинам.

Также можно заметить, что наиболее точные значения скорости звука удалось получить на установке с термостатом, что может быть связано с более качественными датчиками, установленными в ней, и лучшей герметичностью.