

Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Лабораторная работа по общему курсу физики
Термодинамика и молекулярная физика

2.1.3. Определение C_p/C_v по скорости звука в газе

Глаз Роман Сергеевич
Группа Б01-007

Долгопрудный
2021

Содержание

1	Теоретическое введение	1
2	Экспериментальная установка	2
3	Ход работы	3
4	Заключение	9
5	Список используемой литературы	10

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

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

1. Теоретическое введение

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:

$$c = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}},$$

где R - газовая постоянная, T - температура газа, а μ его молярная масса. Выразим показатель адиабаты:

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

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

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

где λ — длина волны звука в трубе, а n — любое целое число.

Скорость звука c связана с его частотой f и длиной волны λ соотношением:

$$c = \lambda f.$$

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

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. Для k -ого резонанса имеем:

$$L_{n+k} = n\frac{\lambda}{2} + k\frac{\lambda}{2},$$

т. е. $\lambda/2$ равно угловому коэффициенту графика, изображающего зависимость длины трубы L от номера резонанса k .

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 λ . Для k -ого резонанса получим:

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

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

2. 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 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 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.

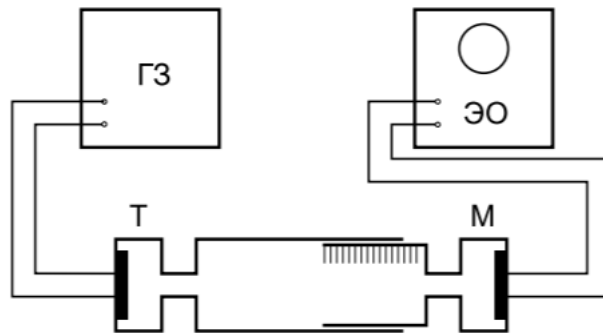


Рис. 1. Установка для измерения скорости звука при помощи раздвижной трубы

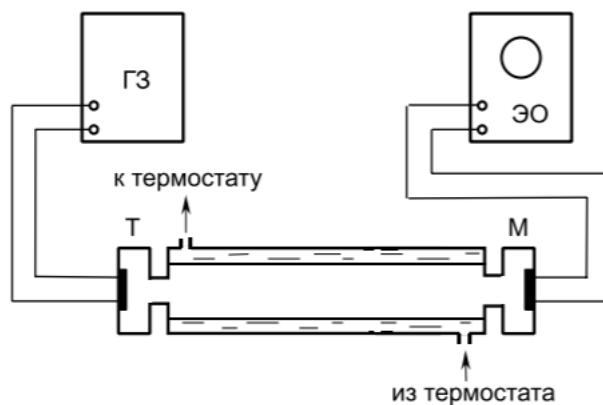


Рис. 2. Установка для изучения зависимости скорости звука от температуры

На этой установке измеряется зависимость скорости звука от температуры.

3. Ход работы

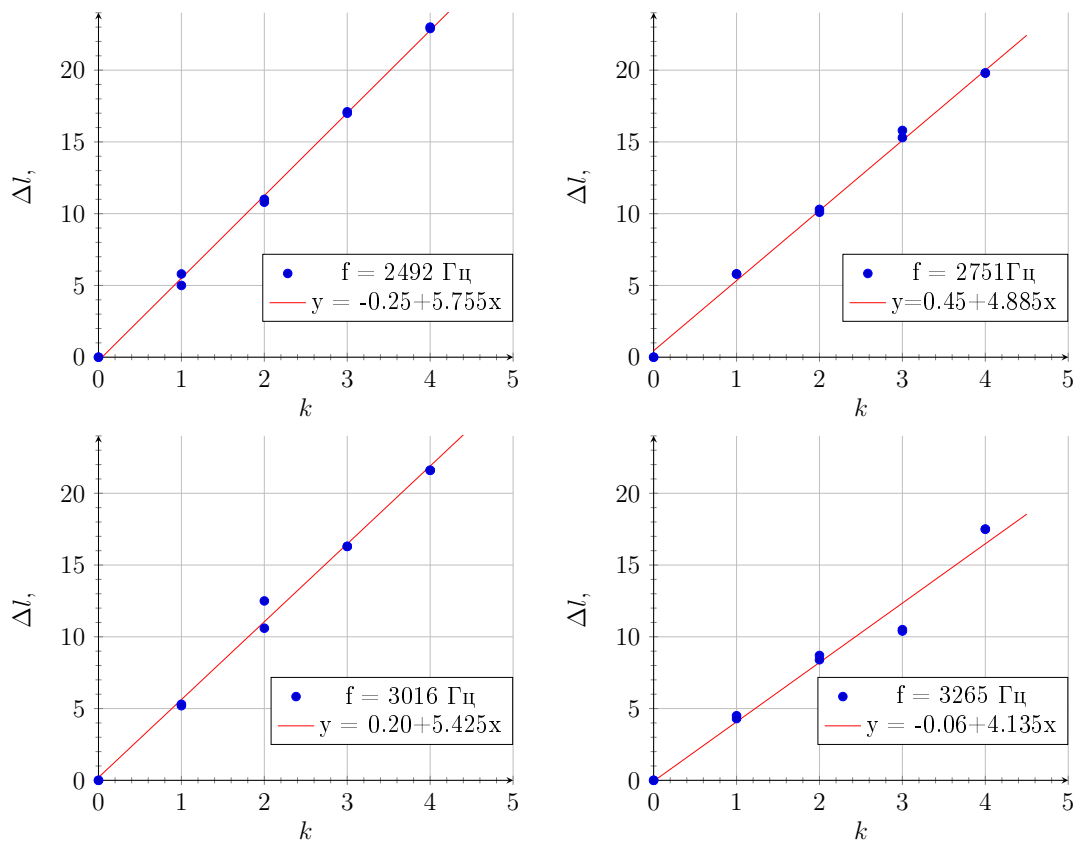
Исходя из примерного значения скорости звука (≈ 270 м/с), предварительно рассчитаем, в каком диапазоне частот следует вести измерения, чтобы при удлинении трубы можно было наблюдать 4 резонанса: $L = \frac{n\lambda}{2}$, $L + \Delta L = \frac{(n+4)\lambda}{2}$. Поскольку $\Delta L \leq 23$ см, то $\lambda \leq 11.5$ см. Следовательно $f \geq 2400$ Гц.

Проведём измерения на первой установке для CO_2 . Плавно изменяя

длину трубы, последовательно зафиксируем все доступные для наблюдения точки резонанса. Измерения проводятся для нескольких частот.

f , Гц	2492		2751		3016		3265	
k	l_1 , см	l_2 , см	l_1 , см	l_2 , см	l_1 , см	l_2 , см	l_1 , см	l_2 , см
0	0	0	0,2	0,2	0,9	0,9	1,0	1,0
1	5,0	5,8	6,0	6,0	6,2	6,1	5,5	5,3
2	11,0	10,8	10,5	10,3	11,5	11,5	9,7	9,4
3	17,0	17,1	16,0	15,5	17,2	17,2	11,4	11,5
4	23,0	22,9	19,5	20,0	22,5	22,5	18,8	18,5

l_1 соответствует значению на размеченной подвижной части трубы укорачиванию длины, а l_2 удлинению. Изобразим полученные результаты на графике, откладывая по оси абсцисс номер k последовательного резонанса, а по оси ординат — соответствующее удлинение трубы Δl . Угловой коэффициент прямой определяет длину полуволны.



Вычислим с помощью полученных графиков скорость звука в углекислом газе и рассчитаем погрешности.

Погрешность σ_c отдельного измерения определяется следующей формулой:

$$\sigma_c = c \sqrt{\left(\frac{\sigma_\lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2}.$$

Результаты представлены в таблице:

$f, \text{Гц}$	2488	2749	3013	3262
$\lambda, \text{м} \cdot 10^{-2}$	5,755	4,885	5,425	4,135
$c, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	286,829	268,773	327,236	270,016
$\sigma_\lambda, \text{м} \cdot 10^{-2}$	0,022	0,022	0,022	0,022
$\sigma_f, \text{Гц}$	5	5	5	5
$\sigma_c, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	1,238	1,305	1,436	1,495

Можно заметить, что значения скоростей звука при различных частотах не совпадают. Усреднив полученные значения найдём окончательное значение скорости звука в углекислом газе.

$$\bar{c} = 288,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (c_i - \bar{c})^2}{4}} = 27,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

$$c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (\sigma_c)^2}{5^2}} = 0,69 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Общая погрешность:

$$\sigma_c = \sqrt{(c_{\text{сл}})^2 + (c)^2} = 27,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Итак,

$$c = 288,2 \pm 27,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Теоретическое значение скорости при температуре $t = 24,1^\circ\text{C}$ равно

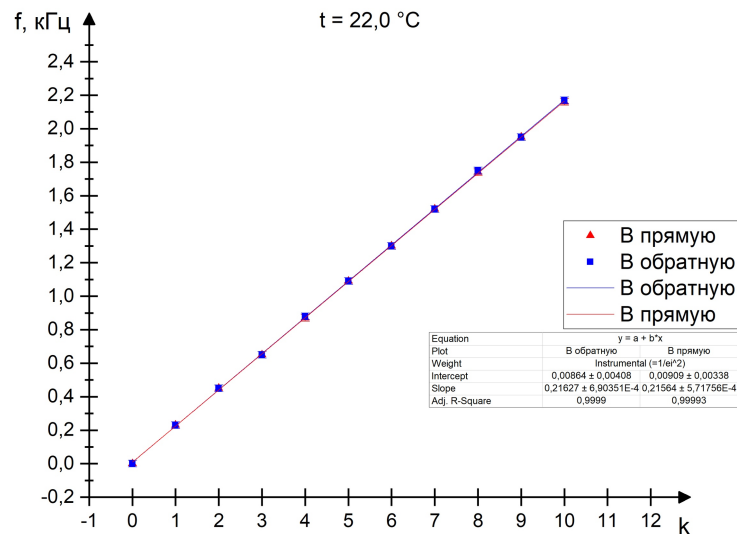
$$= 273,6 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

В пределах погрешности экспериментальное значение совпадает с теоретическим. Однако стоит сказать пару слов о таком сильном разбросе для c . Это может быть связано с тем, что подвижную часть цилиндра двигали не достаточно медленно.

Проведём измерения на второй установке. Данные представлены в таблице.

Начальная температура	22,0 С	Начальная темпе	32,5 С
f, Гц		f, Гц	
1291	1289	1323	1326
1518	1516	1536	1532
1737	1740	1763	1762
1943	1941	1975	1974
2160	2164	2198	2193
2382	2381	2417	2413
2594	2586	2640	2631
2813	2810	2854	2847
3029	3034	3072	3071
3238	3235	3290	3294
3454	3454	3508	3508
	f, Гц		f, Гц

Начальная температура	44,0 С	Начальная темпе	51,1 С	Начальная темпе	59,6 С
f, Гц		f, Гц		f, Гц	
1340	1337	1357	1359	1382	1379
1561	1568	1585	1579	1607	1600
1785	1786	1812	1810	1830	1829
2016	2019	2032	2031	2057	2058
2230	2236	2257	2264	2289	2283
2456	2453	2483	2486	2512	2517
2681	2677	2721	2713	2743	2746
2895	2892	2936	2933	2954	2970
3135	3126	3168	3163	3200	3198
3350	3350	3392	3390	3433	3429
3575	3575	3617	3617	3654	3654
	f, Гц		f, Гц		f, Гц



f_1 - соответствует значениям при увеличении частоты на трубу, f_2 - при уменьшении. Видно, что данные воспроизводятся при обратном ходе.

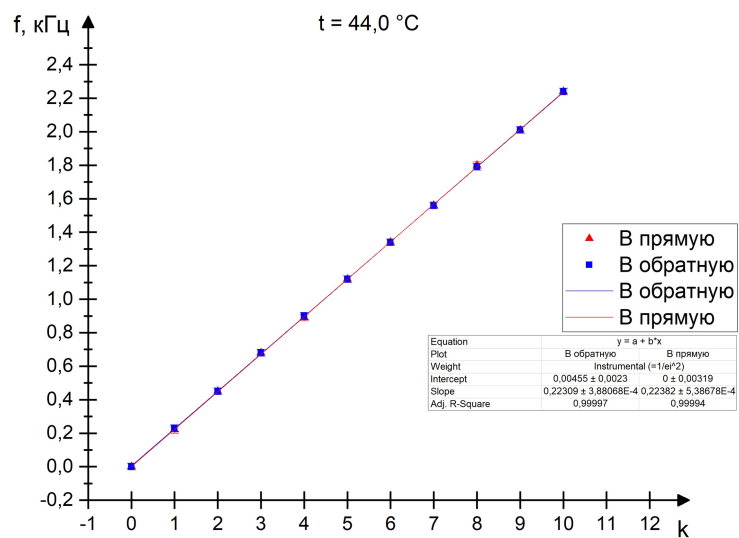
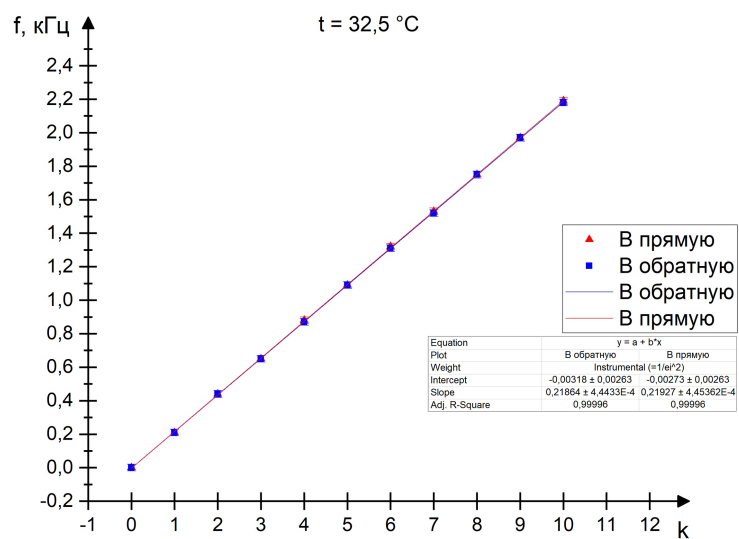
Полученные результаты изобразим на графике, откладывая по оси абсцисс номер резонанса k , а по оси ординат — разность между частотой последующих резонансов и частотой первого резонанса: $\Delta f_k = f_{k+1} - f_1$. Угловой коэффициент прямой определяет величину $c/2L$.

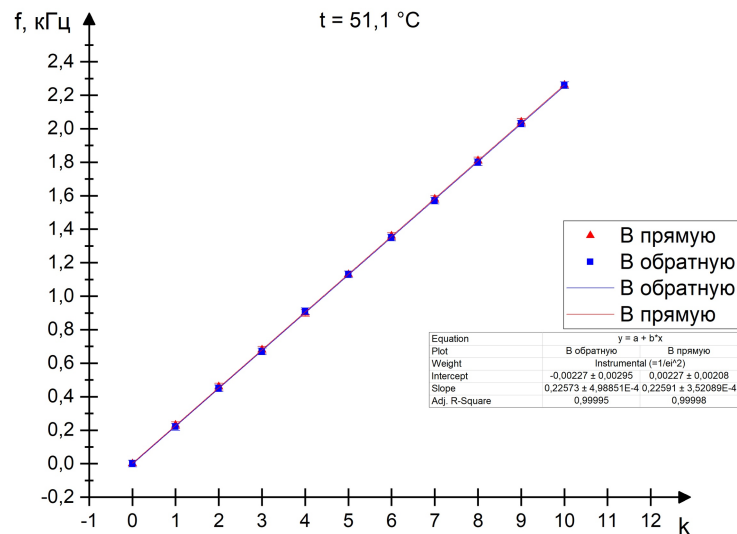
Вычислим с помощью полученных графиков скорость звука в воздухе и рассчитаем погрешности. Погрешность σ_c отдельного измерения определяется следующей формулой:

$$\sigma_c = c \sqrt{\left(\frac{\sigma_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2},$$

где A - коэффициент наклона прямой на графике. Результаты представлены в таблице:

$t, ^{\circ}\text{C}$	22,0	32,5	44	51,1	59,6
$A, \text{Гц}$	216,7	219,0	223,0	226,0	228,0
$c, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	345,6	350,4	356,8	361,6	364,8
$\sigma_A, \text{Гц}$	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
$\sigma_L, \text{м} \cdot 10^{-3}$	1	1	1	1	1
$\sigma_c, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	1,814	1,855	1,815	1,816	1,821
γ	1,413	1,403	1,401	1,408	1,396
σ_{γ}	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014





По полученным данным рассчитаем γ .

$$\bar{\gamma} = 1,402$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (\gamma_i - \bar{\gamma})^2}{4}} = 0,019.$$

Косвенная погрешность определения γ мала, так как $\frac{2\sigma_c}{4c} \approx 0,25\%$.
Итак,

$$\gamma = 1,402 \pm 0,019,$$

что в пределах погрешности совпадает с теоретическим значением $\gamma = 1,4$.

4. Заключение

Если обратить внимание на полученные значения для c , то можно усомниться в справедливости формулы $c^2 = \frac{\gamma RT}{\mu}$ и начать предполагать, что показатель адиабаты является функцией от температуры $\gamma = \gamma(T)$. Однако причина точно не в активировавшихся степенях свободы (температуры очень малы), а в том, что измерения производились не во время достижения термодинамического равновесия и нужно было ждать приличное время (около 5 минут) после того как на термостате установится

необходимая температура, для того чтобы система пришла в пригодное состояние для измерений.

5. Список используемой литературы

- Гладун А. Д. Лабораторный практикум по общей физике. Термодинамика и молекулярная физика
- Сивухин Д. В. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. Том 2
- [Описание лабораторных работ на кафедре общей физики МФТИ](#)