Лабораторная работа 2.1.3. Определение теплоты испарения жидкости

Вязовцев Андрей, Б01-005

16.03.21

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.

Теоритическая справка:

Распространение звука в газе является адиабатическим процессом, поэтому его скорость зависит от показателя адиабаты γ. Выражается она следующей формулой:

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

Отсюда находим:

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

Т. к. в запаянном сосуде волны, распространяющиеся вдоль трубы, испытывают отражения, резонанс будет наблюдаться, если длина трубы L удовлетворяет следующему условию:

$$L = n\frac{\lambda}{2},\, n \in \mathbb{Z}$$

При этом будут места, где слои газа не испытывают смещения (узлы смещения), они повторяются по всей длине через $\dfrac{\lambda}{2}$. Между ними находятся максимумы смещения (пучности).

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

$$c = \lambda f \tag{1}$$

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

1. Изменение длины трубы. Для последовательных резонансов имеем:

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

Отсюда следует, что $L(k)$ — линейная зависимость, а коэффициент наклона данной прямой есть $\dfrac{\lambda}{2}$.

2. Изменение частоты звуковых колебаний. Для последовательных резонансов получим:

$$L = \frac{\lambda_1}{2}n = \frac{\lambda_2}{2}(n+1) = \ \ldots\ = \frac{\lambda_k}{2}(n+k) \tag{2}$$

Из уравнений (1) и (2) получаем:

$$f_{k+1} = f_1 + \frac{c}{2L}k$$

Следовательно, $f(k)$ — линейная зависимость, её коэффициент наклона — $\dfrac{c}{2L}$

Экспериментальная установка:

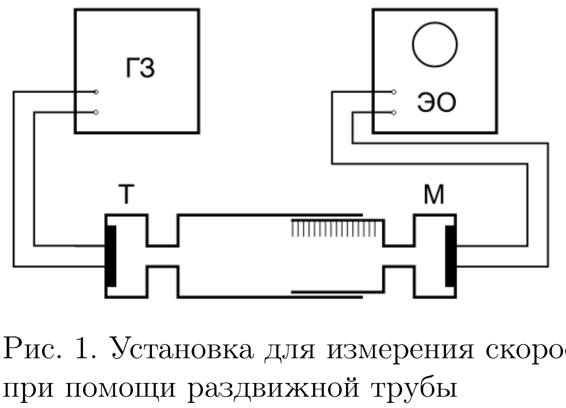


Рис. 1. Установка для измерения скорости звука при помощи раздвижной трубы

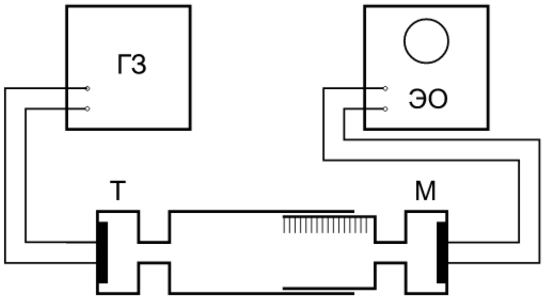


Рис. 2. Установка для изучения зависимости скорости звука от температуры

Ход работы:

1. Сначала проведём эксперименты на экпериментальной установке №1. Включим в ЭО и ГЗ, подождём, пока они прогреются (5-7 минут). После этого настроим осциллограф. Продуем трубу от углекислого газа, который мог остаться от предыдущих опытов.

2. Рассчитаем, в каком диапозоне частот следует вести измерения, чтобы можно было наблюдать 2-5 резонансов. Т. к. изначально труба имеет длину $L_{min} = 700 \pm 5$мм и может удлиняться до $L_{min} = 930 \pm 5$мм, из несложных соображений получаем:

$$f_{min} = \frac{(2-1)c}{2(L_{max} - L_{min})} \approx 700 \text{ Гц}$$
$$f_{max} = \frac{(5-1)c}{2(L_{max} - L_{min})} \approx 3 \text{ кГц}$$

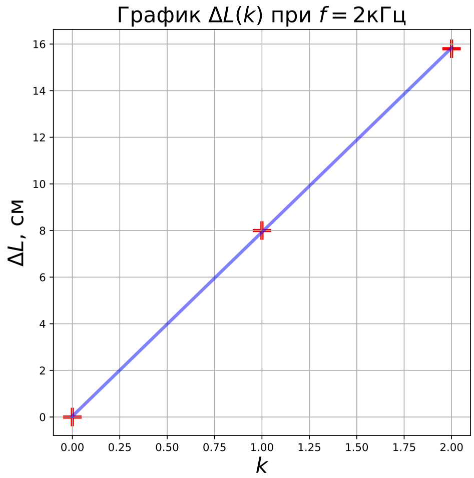
Стоит отметить, что т. к. скорость звука несколько выше, а в результате экспериментов мы будем получать больше 5 резонансов, измерения будут проводиться в немного другом диапозоне частот.

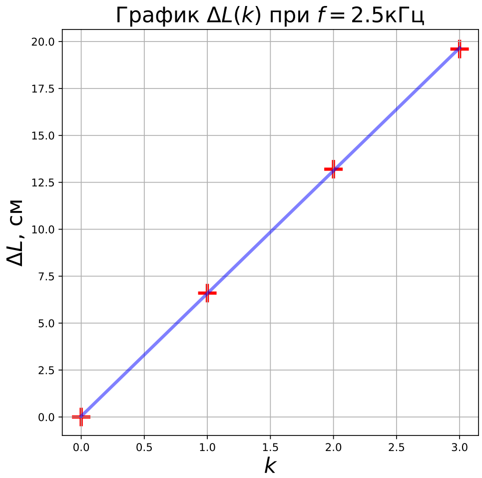
3. Будем плавно уменьшать длину трубы от L_{max} до L_{min} и фиксировать, при каких длинах трубы L наблюдается резонанс. Проведём данные измерения для 6 различных частот. Результаты внесём в табл. 1.

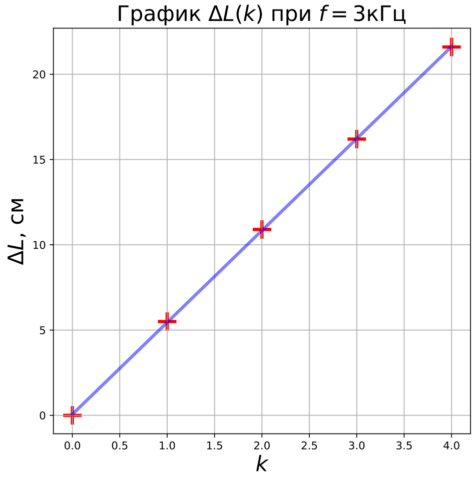
4. Изобразим зависимость $\Delta L(k)$ для каждого значения частоты, где $\Delta L = L_{n+k} - L_n$.

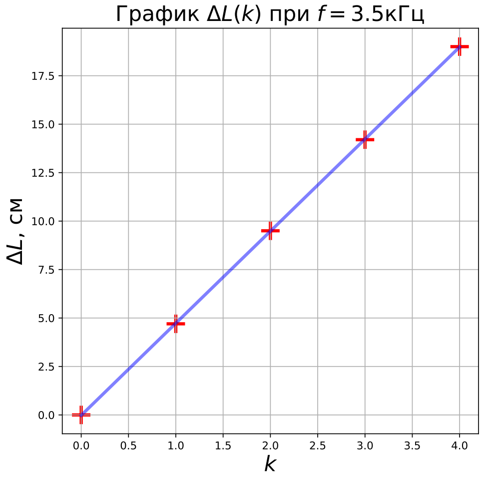
f, кГц	L, мм							
2,0	17,8	10,0	2,0					
2,5	21,6	15,2	8,6	2,0				
3,0	21,6	16,2	10,9	5,5	0,0			
3,5	20,0	15,2	10,5	5,7	1,0			
4,2	22,7	19,1	15,6	12,1	8,5	4,9	1,3	
5,0	22,2	19,1	16,1	13,0	10,0	6,9	3,8	0,7

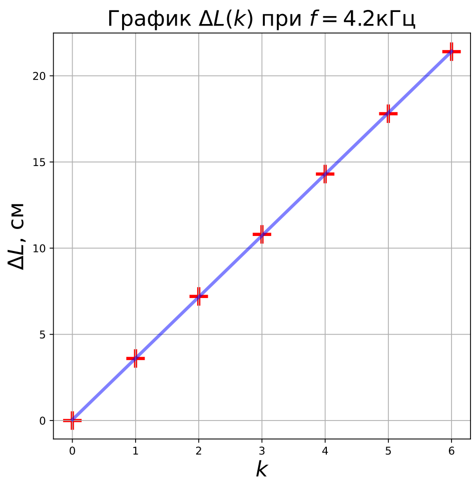
Таблица 1. Резонансы воздуха, установка 1

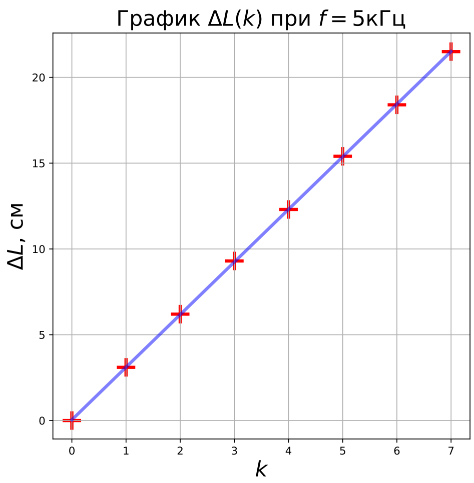












5. Теперь найдём $\frac{\lambda}{2}$ как коэффициент наклона этих графиков, а после можно найти скорость звука:

$$c_{2.0} = 316\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \qquad c_{2.5} = 327\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \qquad c_{3.0} = 323\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$
$$c_{3.5} = 333\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \qquad c_{4.2} = 299\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \qquad c_{5.0} = 307\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Т. к. погрешность генератора частот пренебрежимо мала ($\varepsilon_f \approx 0{,}01\%$), верно следующее: $\varepsilon_c = \varepsilon_\lambda$. Из формулы для погрешности МНК получаем:

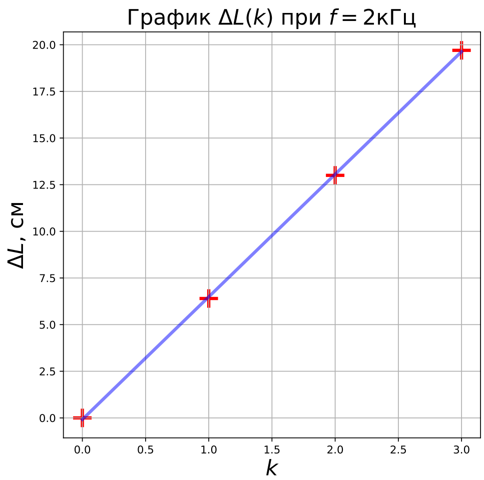
$$\varepsilon_{c_{2.0}} = 0{,}4\% \qquad \varepsilon_{c_{2.5}} = 0{,}4\% \qquad \varepsilon_{c_{3.0}} = 0{,}3\%$$
$$\varepsilon_{c_{3.5}} = 0{,}2\% \qquad \varepsilon_{c_{4.2}} = 0{,}2\% \qquad \varepsilon_{c_{5.0}} = 0{,}2\%$$

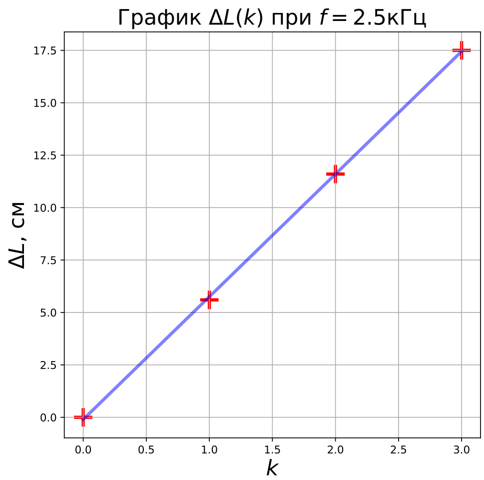
Таким образом, наиболее точными измерениями являются последние, в которых было больше резонансов. Стоит отметить, что значения, полученные в различных опытах, отличаются не более чем на 10%. Значит, эти значения находятся в согласии друг с другом.

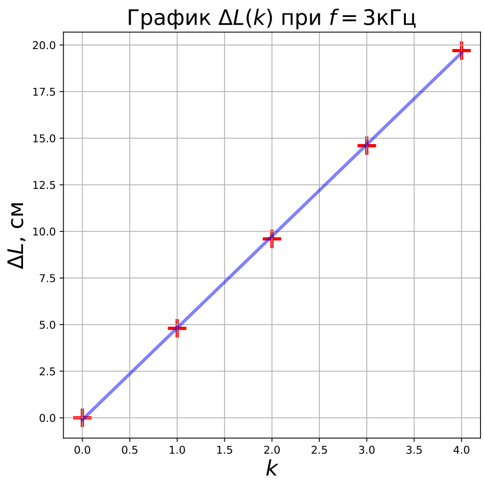
6. Продуем трубу углекислым газом, после чего найдём скорость звука в углекислом газе, для этого проделаем те же действия, что и в предыдущих пунктах. Внесём результаты экспериментов в табл. 2, построим графики, найдём c и погрешности.

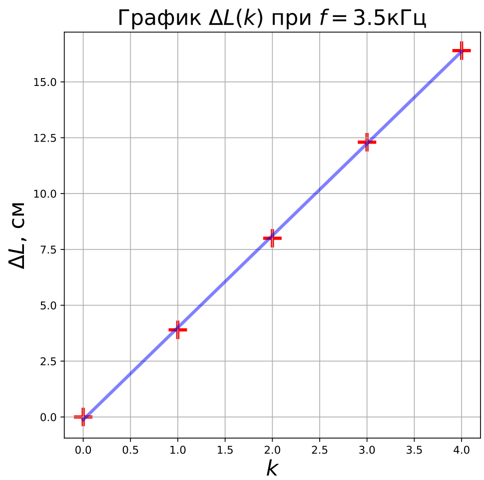
f, кГц	L, мм						
2,0	22,4	15,7	9,1	2,7			
2,5	17,9	12,0	6,0	0,4			
3,0	21,9	16,8	11,8	7,0	2,2		
3,5	19,9	15,8	11,5	7,4	3,5		
4,0	22,7	18,8	15,2	11,6	8,2	4,5	1,0

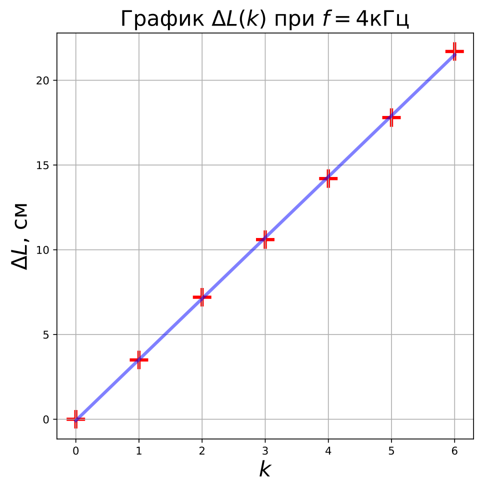
Таблица 2. Резонансы углекислого газа, установка 1











Скорости звука:

$$c_{2.0} = 263\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \qquad c_{2.5} = 293\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \qquad c_{3.0} = 295\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$
$$c_{3.5} = 288\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \qquad c_{4.2} = 288\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Их погрешности:

$$\varepsilon_{c_{2.0}} = 0{,}5\% \qquad \varepsilon_{c_{2.5}} = 0{,}7\% \qquad \varepsilon_{c_{3.0}} = 0{,}6\%$$
$$\varepsilon_{c_{3.5}} = 0{,}7\% \qquad \varepsilon_{c_{4.2}} = 0{,}6\%$$

7. Теперь проведём измерения на второй установке. Будем изменять частоту ГЗ, и фиксировать последовательные резонансы. Сделаем это для нескольких температур. Результаты занесём в табл. 3.

t, ^oC	f, Гц				
23	195	450	660	870	1100
30	220	460	660	880	1110
40	207	465	675	895	1115
50	205	470	690	910	1135
60	203	472	695	922	1150

Таблица 3. Резонансы, установка 2

Графики $f(k)$:

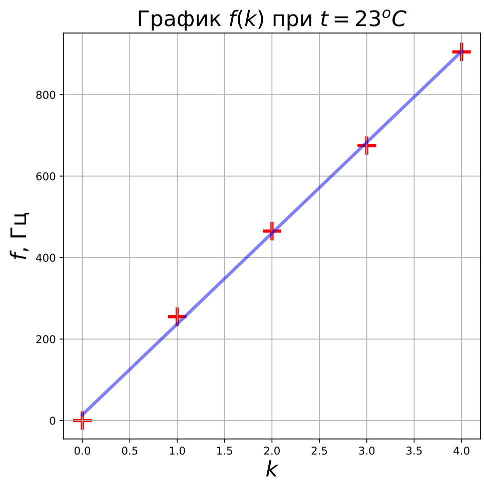


График $f(k)$ при $t = 23^oC$
f, Гц
k

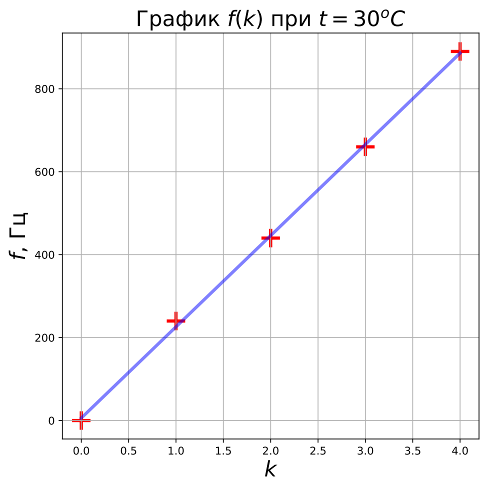


График $f(k)$ при $t = 30^oC$
f, Гц
k

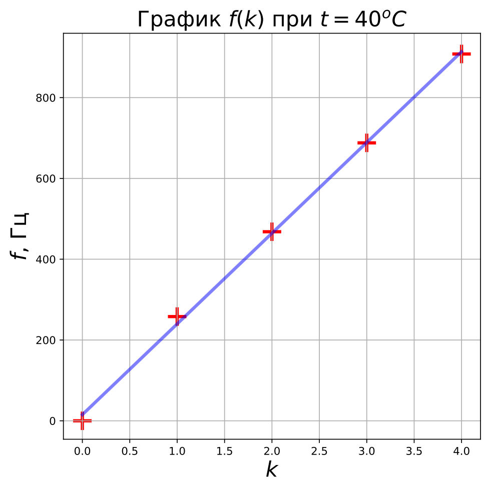


График $f(k)$ при $t = 40^oC$
f, Гц
k

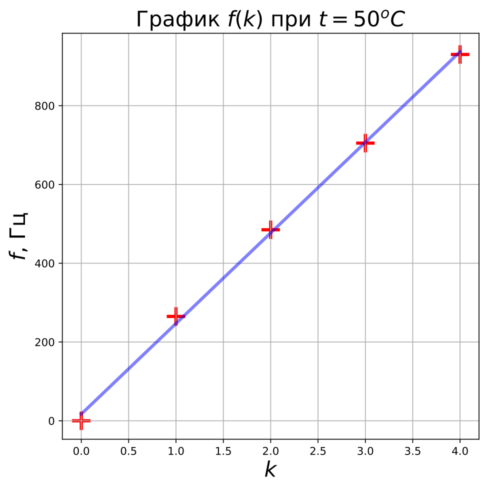


График $f(k)$ при $t = 50^oC$
f, Гц
k

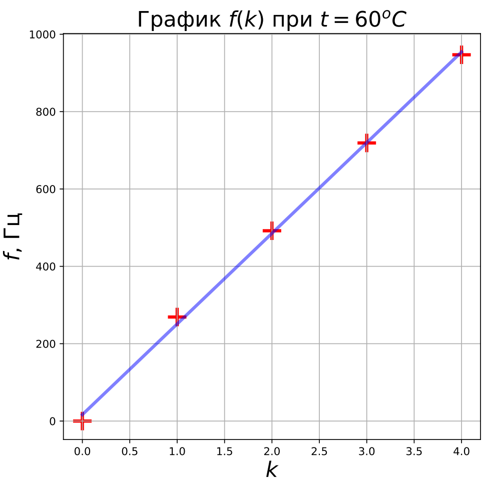


График $f(k)$ при $t = 60^oC$
f, Гц
k

По коэффициенту наклона, который равен $\dfrac{c}{2L}$ найдём скорость звука. Учтём, что $L = 700$ мм.

$$c_{23} = 312\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \qquad c_{30} = 308\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \qquad c_{40} = 314\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$
$$c_{50} = 322\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \qquad c_{60} = 328\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

По аналогии с установкой 1 находим погрешности для скорости звука:

$$\varepsilon_{c_{23}} = 1{,}5\% \qquad \varepsilon_{c_{30}} = 1{,}1\% \qquad \varepsilon_{c_{40}} = 1{,}6\%$$
$$\varepsilon_{c_{50}} = 1{,}7\% \qquad \varepsilon_{c_{60}} = 1{,}6\%$$

8. Найдём показатель адиабаты по формуле:

$$\gamma = \frac{\mu}{RT}c^2 \approx \frac{29 \cdot 10^{-3}}{8.314 \cdot 296} \cdot 308^2 \approx 1{,}11$$

Для нахождения относительной погрешности воспользуемся тем, что $\varepsilon_T = \dfrac{1}{296}$, а $\varepsilon_c = \varepsilon_{c_{23}} = 1{,}5\%$

$$\varepsilon_\gamma = \sqrt{\varepsilon_c^2 + \varepsilon_T^2} \approx 1{,}5\%$$

Итак, $\gamma = 1{,}11 \pm 0{,}02$