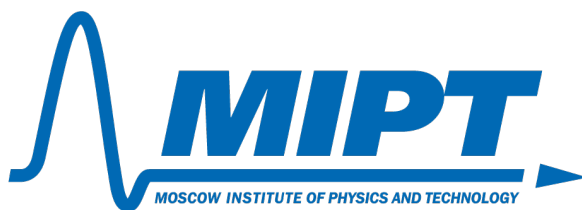


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
ФАКУЛЬТЕТ ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ



Лабораторная работа № 2.1.3
Определение C_p/C_v по скорости звука в газе

Баранов Даниил
Группа Б02-103

Долгопрудный, 2022 г.

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 Теоритическая часть

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. Преобразовав 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 λ – 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 λ 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 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).

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 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.

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 патрубков (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.

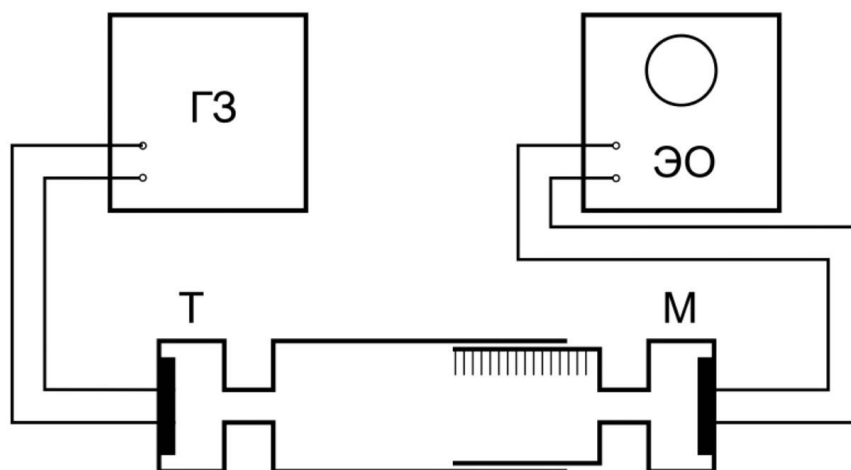


Рис. 1: Установка для измерения скорости звука при помощи раздвижной трубы

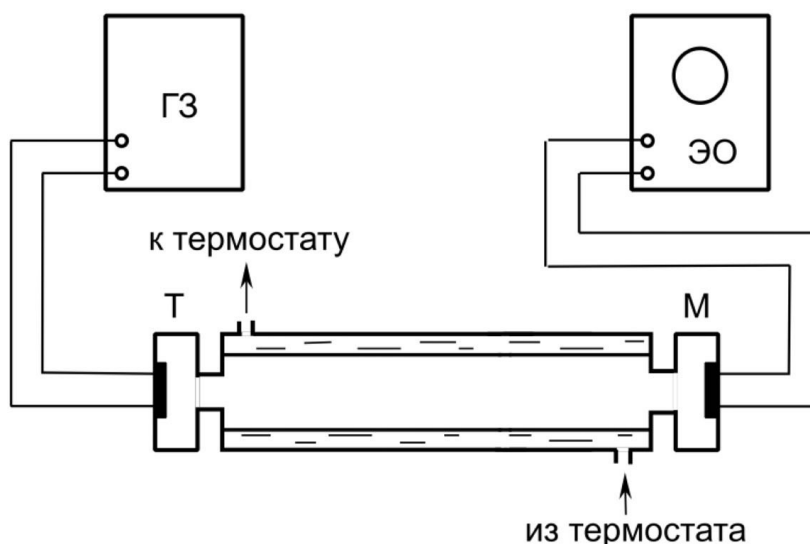


Рис. 2: Установка для изучения зависимости скорости звука от температуры

3 Результаты измерений

Проведём измерение коэффициента C_p/C_v для воздуха при помощи установки с раздвижной трубой. Для проведения серии измерений фиксируем частоту звукового сигнала и оставляем её неизменной до окончания снятия показаний. Увеличиваем и уменьшаем длину трубки, чтобы добиться резонанса, возникновение которого устанавливается при помощи осциллографа. При возникновении резонанса фиксируем то расстояние, на которое была выдвинута трубка прибора. Данные измерения проводим для нескольких значений частот. Полученные результаты заносим в таблицу 1. Все измерения проводились при температуре в комнате $T = 297.5\text{K}$

Средняя погрешность измеренной длины составила $\sigma_L \approx 1\text{ мм}$.

Проведём измерения C_p/C_v для воздуха при различных температурах. Для этого будем использовать трубу постоянного размера $L = 700 \pm 1\text{ мм}$. Для фиксированной температуры будем изменять частоту звукового сигнала, тем самым изменяя

Воздух, $L = 575$ мм					
ν , кГц	2	3	4	5	6
ΔL_1 , мм	31	4	34	16	6
ΔL_2 , мм	118	62	77	52	36
ΔL_3 , мм	203	119	121	86	65
ΔL_4 , мм	–	177	162	122	94
ΔL_5 , мм	–	–	207	156	123
ΔL_6 , мм	–	–	–	191	151

CO_2 , $L = 575$ мм					
ν , кГц	2	3	4	5	6
ΔL_1 , мм	38	8	7	30	–
ΔL_2 , мм	108	61	43	57	–
ΔL_3 , мм	181	113	80	92	–
ΔL_4 , мм	–	174	116	115	–
ΔL_5 , мм	–	–	154	141	–
ΔL_6 , мм	–	–	195	172	–

Таблица 1: Увеличение длины трубы при резонансе

и длину волны, так, чтобы мы могли наблюдать последовательные резонансы. Для каждого резонанса будем фиксировать частоту, при которой он возник. Полученные измерения занесём в таблицу 2.

$t = 23^\circ C$		$t = 35^\circ C$		$t = 50^\circ C$	
k	$\nu_{\text{рез}}$, Гц	k	$\nu_{\text{рез}}$, Гц	k	$\nu_{\text{рез}}$, Гц
1	264	1	263	1	275
2	498	2	507	2	519
3	741	3	755	3	773
4	989	4	1009	4	1031
5	1235	5	1259	5	1288
6	1480	6	1509	6	1543
7	1727	7	1753	7	1799
8	1976	8	2013	8	2061
9	2218	9	2260	9	2312

Таблица 2: Результаты измерений резонансной частоты при разных температурах и числу полуволин

Максимальная погрешность измеренной частоты оказалась равной $\sigma_\nu \approx 3$ Гц.

4 Обработка полученных данных

По данным таблицы 1 построим графики (3 и 4) зависимости удлинения трубы от номера полученного резонанса, считая первое удлинение соответствующим первому резонансу (вычитание константы не меняет наклон графика).

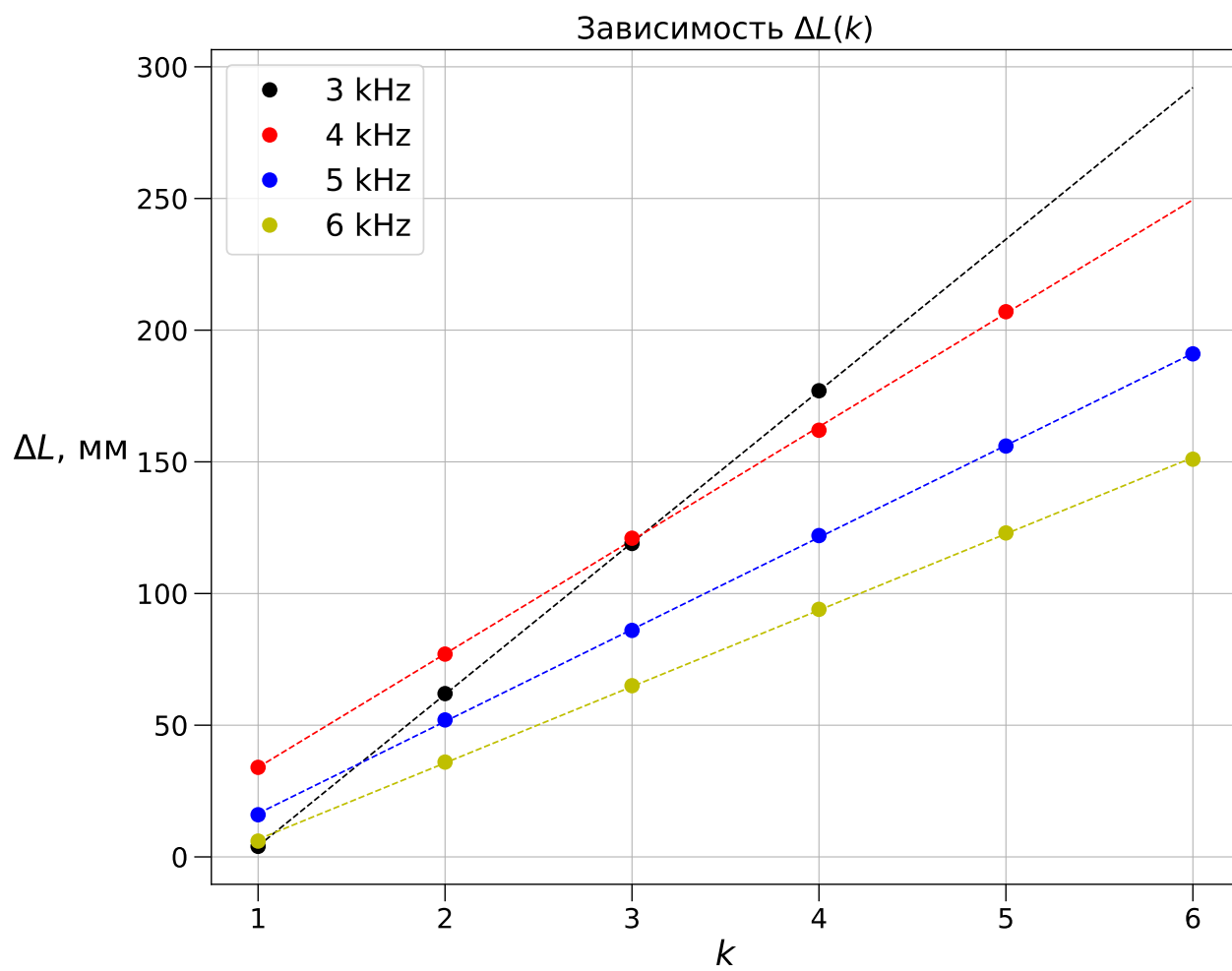


Рис. 3: График зависимости удлинения трубы от номера полученного резонанса для воздуха

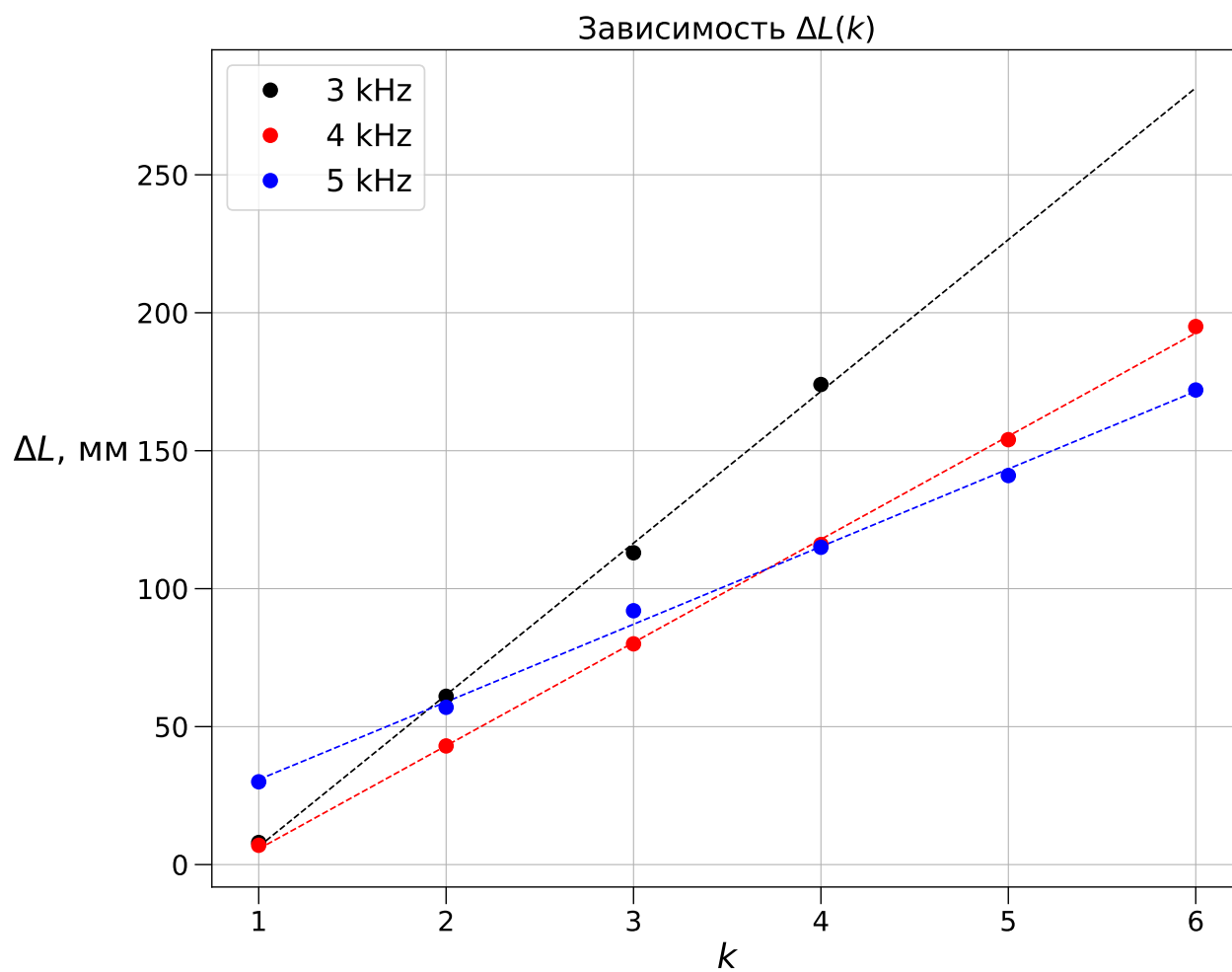


Рис. 4: График зависимости удлинения трубы от номера полученного резонанса для CO_2

Для каждого значения частоты найдём соответствующий ей коэффициент наклона умножим его на удвоенную частоту. По этим данным построим график 5 зависимости скорости от частоты.

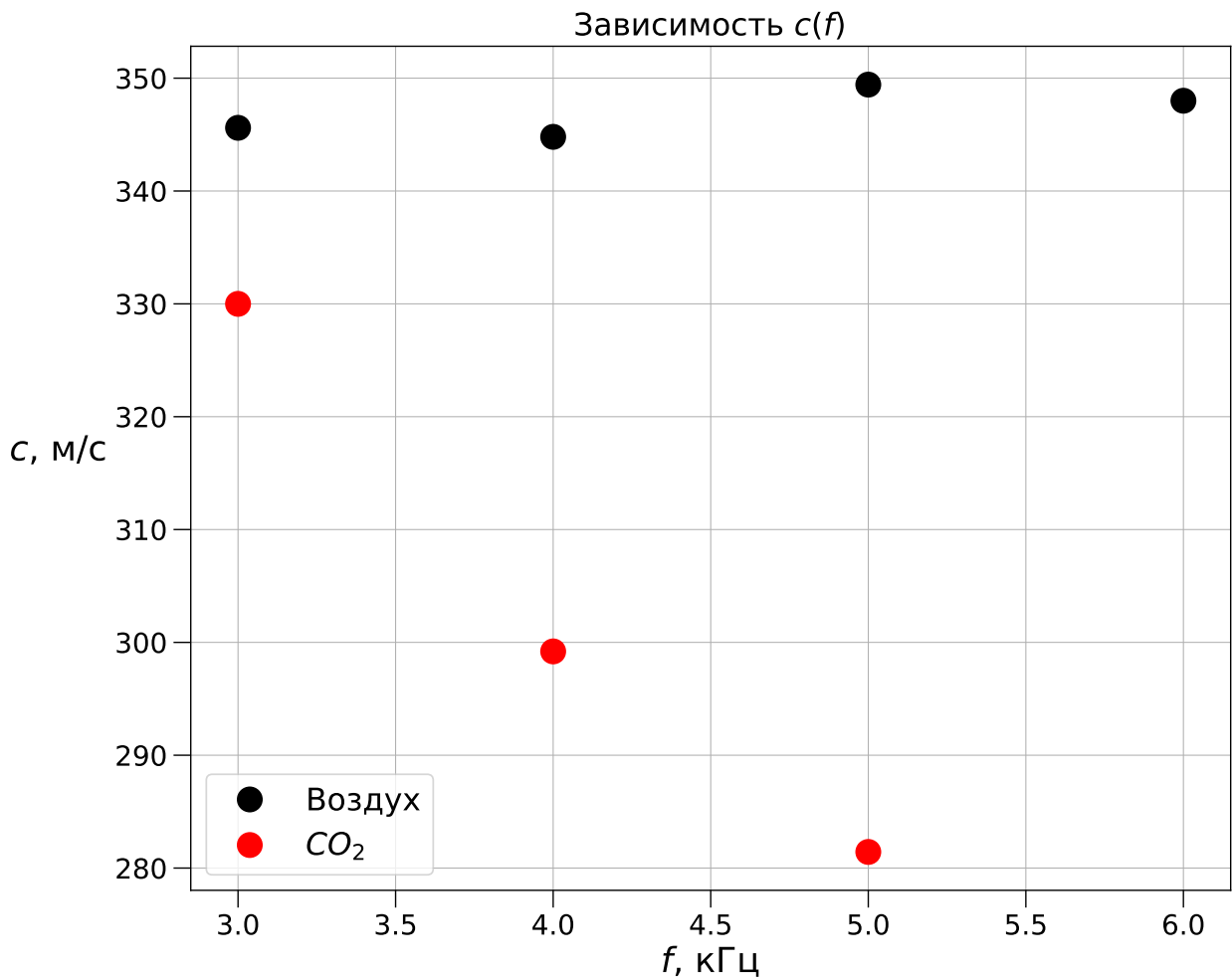


Рис. 5: График зависимости скорости звука от частоты

По графику видно, что для воздуха эта скорость является константой и равна $c_{\text{возд}} = 347 \pm 3$ м/с. Для углекислого газа наблюдается слишком большой разброс точек для определения скорости звука газе. Это свидетельствует о неудачной методике эксперимента или ошибке экспериментатора во время получения данных.

По формуле 2 найдём соотношение C_p/C_v :

$$\gamma = 1,41 \pm 0,02$$

Это соответствует табличным данным в пределах погрешности.

По данным таблицы 2 построим график (6) зависимости $f_{k+1} - f_1$ от номера резонанса при различных температурах.

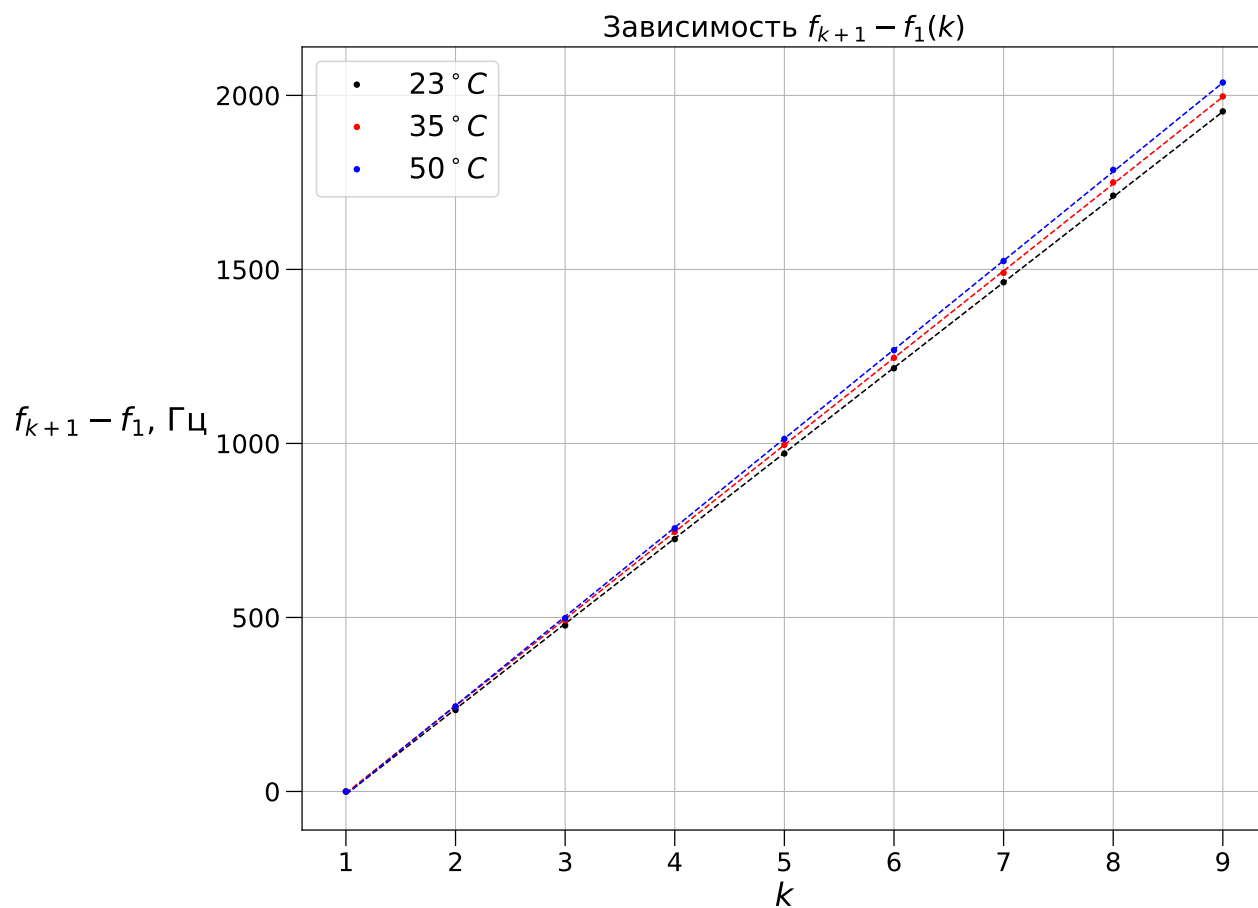


Рис. 6: График зависимости $f_{k+1} - f_1$ от номера резонанса при различных температурах

По наклону графика найдём скорость звука для каждой температуры:

$$c_{23} = 343,3 \pm 0,7 \text{ м/с}$$

$$c_{35} = 350,0 \pm 0,6 \text{ м/с}$$

$$c_{50} = 357,8 \pm 0,7 \text{ м/с}$$

По формуле 2 найдём C_p/C_v :

$$\gamma_{23} = 1,39 \pm 0,01$$

$$\gamma_{35} = 1,39 \pm 0,01$$

$$\gamma_{50} = 1,38 \pm 0,01$$