

Работа 2.1.3
"Определение C_p/C_v по скорости звука в газе"
Б01-005 Радькин Кирилл

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

В работе используются:

- Звуковой генератор ГЗ; электронный осциллограф ЭО; микрофон; телефон; раздвижная труба; тепло- изолированная труба, обогреваемая водой из термостата; баллон со сжатым углекислым газом; газгольдер.

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. Преобразуя эту формулу, найдем:

$$\gamma = \frac{\mu}{RT} c^2 \quad (1)$$

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, вообще говоря, очень сложны. Картина упрощается, если длина трубы L равна целому числу полуволн, то есть когда:

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

где λ — длина волны звука в трубе, а n — любое целое число. Если условие (2) 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 (узел смещения). Узлы смещения повторяются по всей длине трубы через $\frac{\lambda}{2}$. Между узлами находятся максимумы смещения (пучности).

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:

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

т. е. $\frac{\lambda}{2}$ 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:

$$L = \frac{\lambda_1}{2} n = \frac{\lambda_2}{2} (n+1) = \dots = \frac{\lambda_{k+1}}{2} (n+k) \quad (4)$$

Из (3) и (4) имеем:

$$f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{c}{2L} n, f_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{c}{2L} (n+1) = f_1 + \frac{c}{2L}, \dots, f_{k+1} = \frac{c}{\lambda_{k+1}} = \frac{c}{2L} (n+k) = \frac{c}{2L} k + f_1 \quad (5)$$

Скорость звука, деленная 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 T и улавливаются микрофоном M . 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.

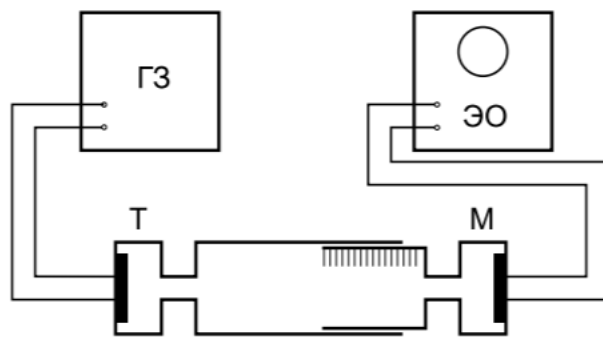


Рис. 1. Установка для измерения скорости звука при помощи раздвижной трубы

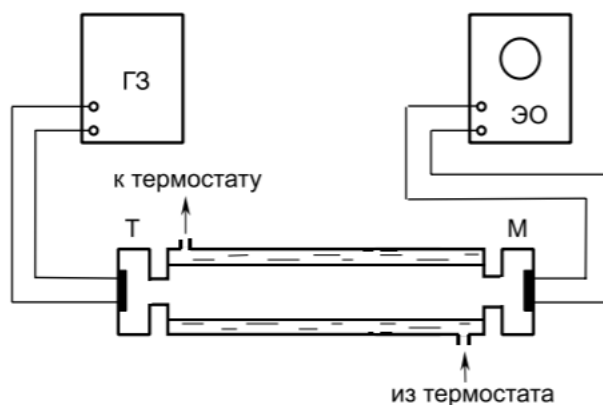


Рис. 2. Установка для изучения зависимости скорости звука от температуры

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.

Ход работы:

1. Включим в сеть электронный осциллограф ЭО и звуковой генератор ГЗ и дадим им прогреться 5–7 минут. После этого включим тумблер «Луч» и ручками управления осциллографа добьемся того, чтобы на экране была видна линия, прочерченная электронным лучом.

Установим нулевое значение шкалы частот звукового генератора (только для генератора ГЗ-18). Для этого лимбы «Частота» и «Расстройка» установим на нуль и вращением ручки «Установка нуля» добьемся того, чтобы стрелка вольтметра остановилась на нуле. Время от времени проверяем, не сбилась ли установка нуля.

2. Подберем напряжение на выходе генератора так, чтобы при резонансе на осциллографе наблюдались колебания достаточной амплитуды. Остановим картину на осциллографе. Убедимся в том, что колебания имеют неискаженную синусоидальную форму. Если форма колебаний искажена, уменьшаем амплитуду сигнала, поступающего с генератора, пока искажения не прекратятся.

3. Измерения на первой установке (рис. 1):

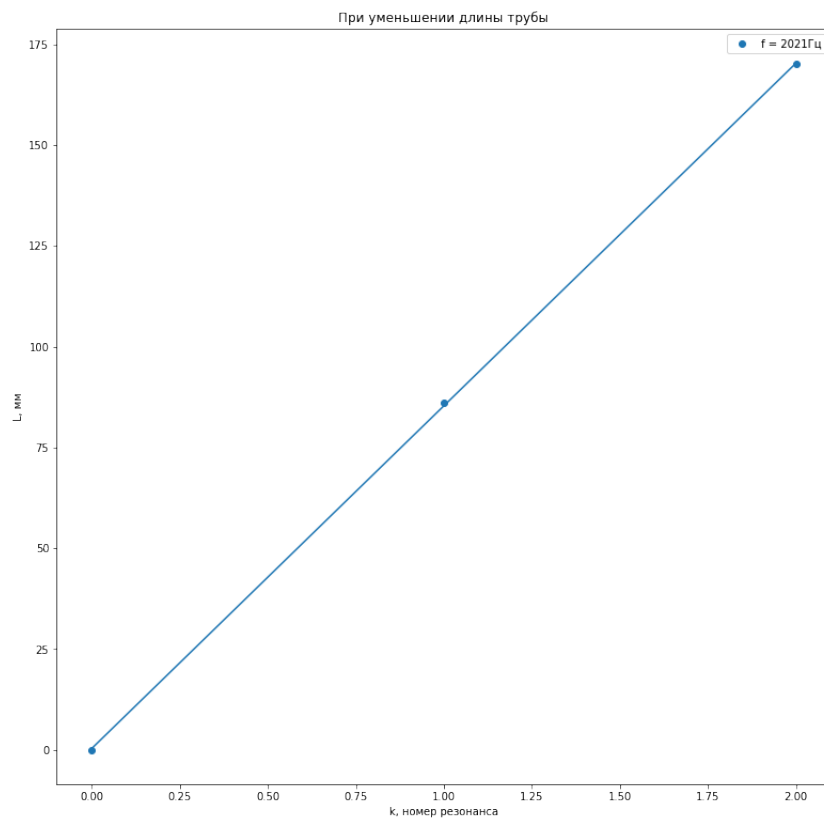
- (а) Исходя из примерного значения скорости звука (300 м/с), рассчитаем, в каком диапазоне частот следует вести измерения, чтобы при удлинении трубы можно было наблюдать 2–5 резонансов.

Диапазон изменение длины трубы: $\Delta l = 230 \text{ мм} \rightarrow$ в него должно укладываться 5 полу-
волн $\rightarrow \lambda \leq 0.115 \text{ м} \rightarrow f \geq 2600 \text{ Гц}$

- (b) Используя многоходовый или кнопочный кран, продует трубу воздухом (в ней мог остаться углекислый газ). Плавно изменяя длину трубы, последовательно пройдем через все доступные для наблюдения точки резонанса. Повторим измерения при других частотах (всего 4–6 различных значений частоты). Для каждого резонанса измерим соответствующее удлинение трубы. Проведем измерения, сначала увеличивая длину трубы, а затем уменьшая ее. (верхняя строка таблицы — при уменьшении, нижняя — при увеличении).

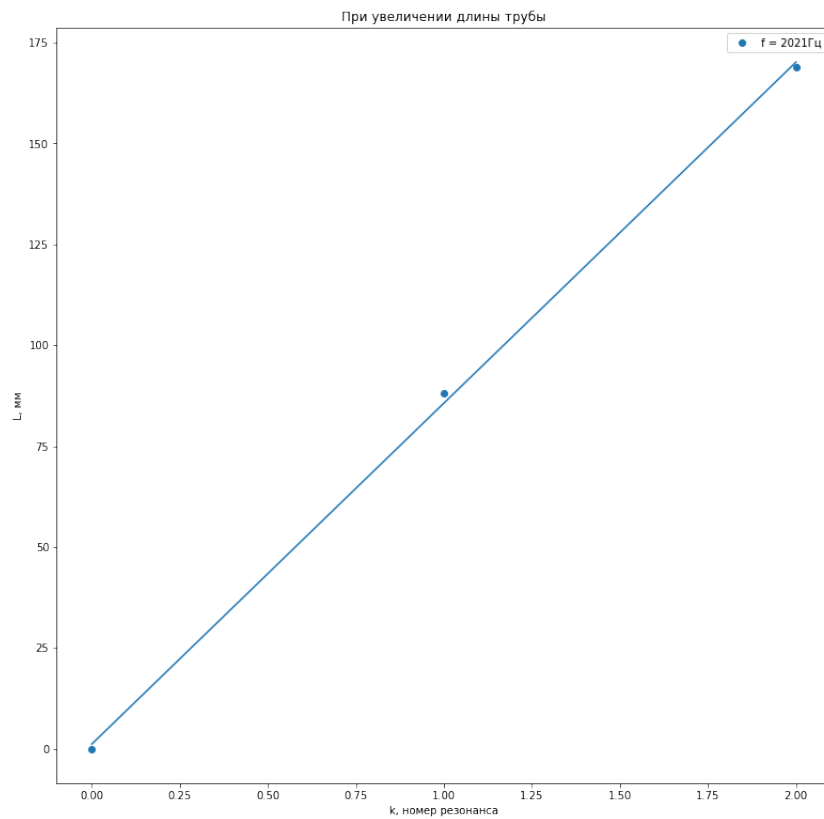
L, мм				
f = 2021 Гц				
32	118	202		
28	116	197		
f = 2506 Гц				
55	122	191		
55	125	193		
f = 3062 Гц				
56	112	169	225	
56	112	170	226	
f = 3508 Гц				
25	74	124	173	222
25	75	124	173	222
f = 3599 Гц				
39	83	126	170	213
39	83	126	170	213

- (с) Изобразим полученные результаты на графике, откладывая по оси абсцисс номер k последовательного резонанса, а по оси ординат — соответствующее удлинение трубы $L_{n+k} - L_n$. Через точки, полученные при одном и том же значении частоты, проведите наилучшую прямую. Угловой коэффициент прямой определяет длину полуволны.



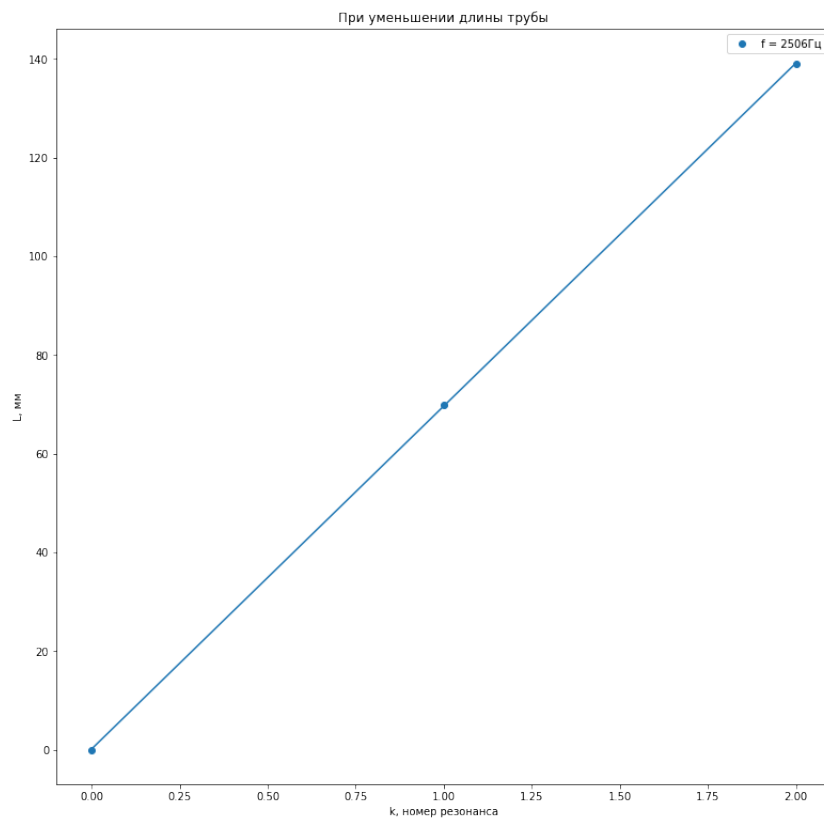
$$\frac{\lambda}{2} = (85.0 \pm 0.3) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 343.5 \pm 1.4 \text{ м/с}$$



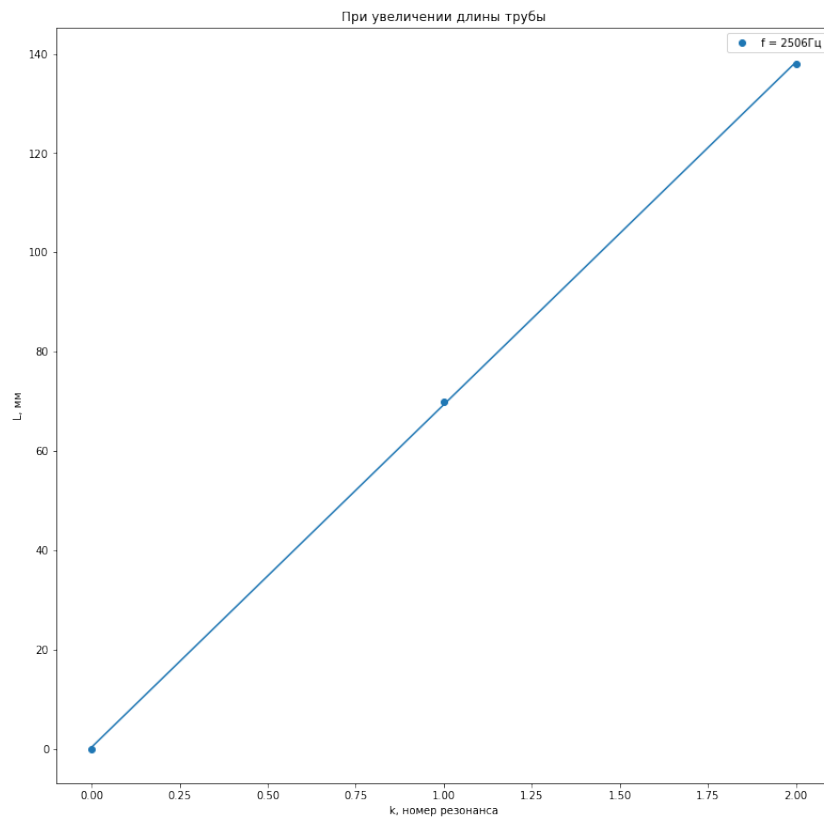
$$\frac{\lambda}{2} = (84.5 \pm 1.2) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 341.5 \pm 4.7 \text{ м/с}$$



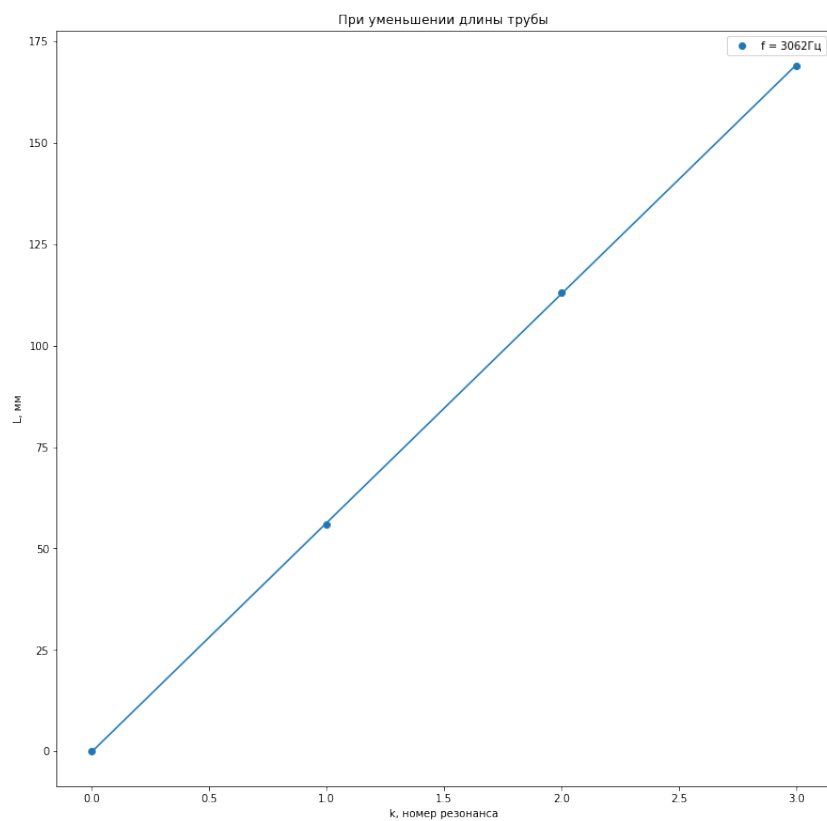
$$\frac{\lambda}{2} = (69.5 \pm 0.2) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 348.3 \pm 0.8 \text{ м/с}$$



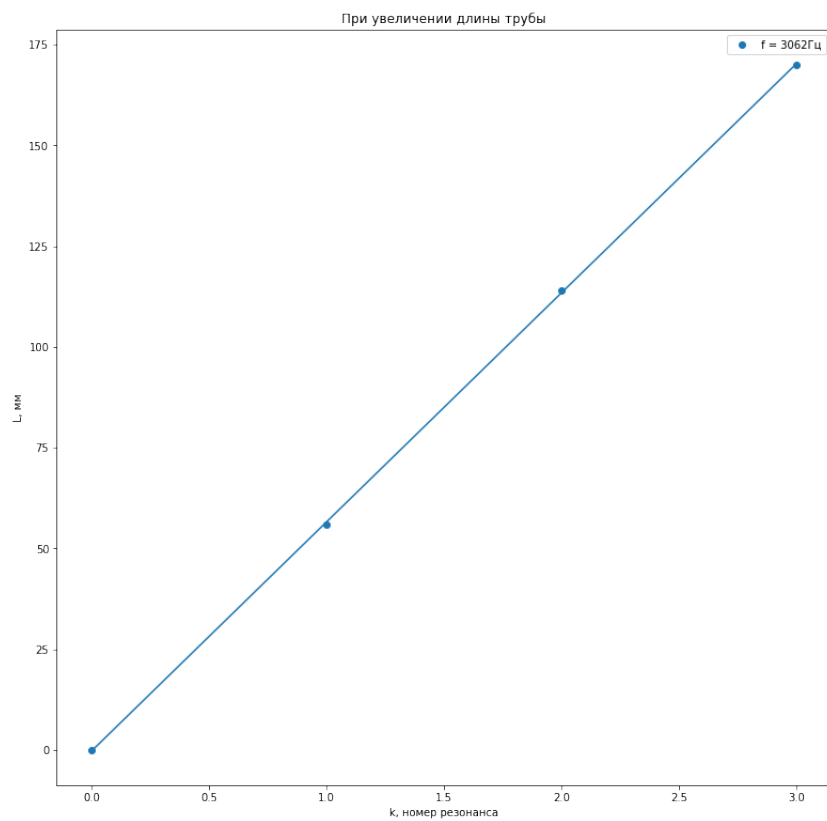
$$\frac{\lambda}{2} = (69.0 \pm 0.3) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 345.8 \pm 1.7 \text{ м/с}$$



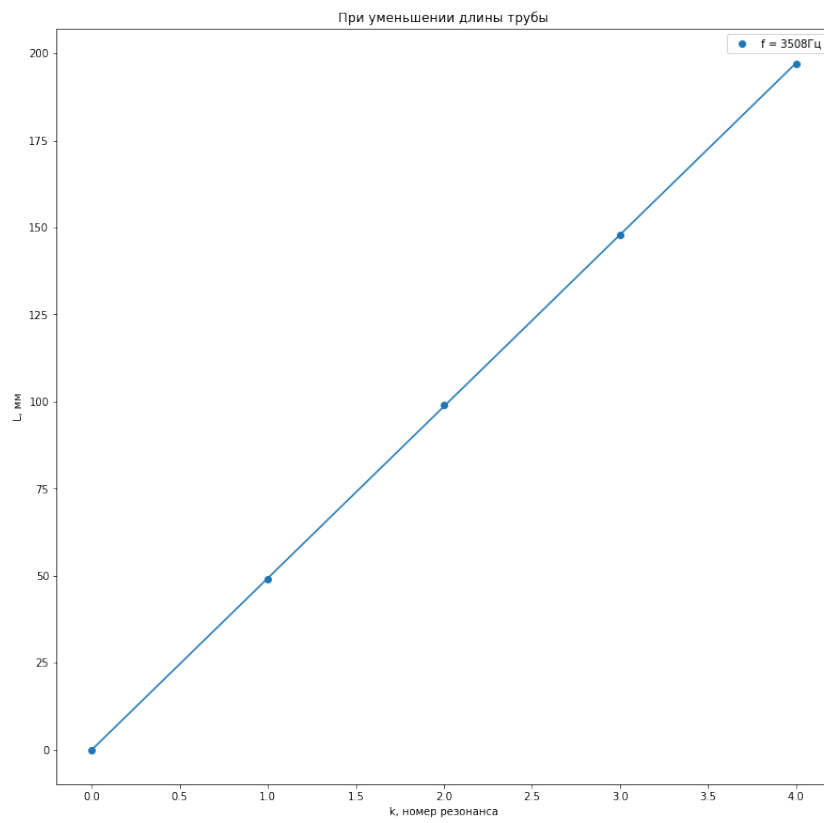
$$\frac{\lambda}{2} = (56.4 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 345.4 \pm 0.6 \text{ м/с}$$



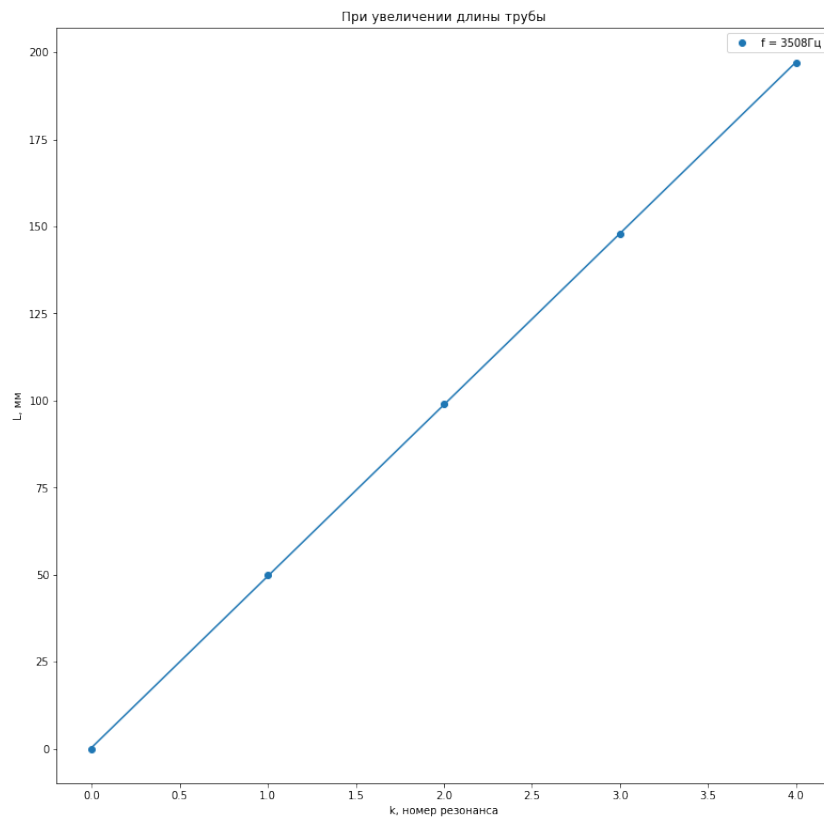
$$\frac{\lambda}{2} = (56.8 \pm 0.2) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 347.8 \pm 1.2 \text{ м/с}$$



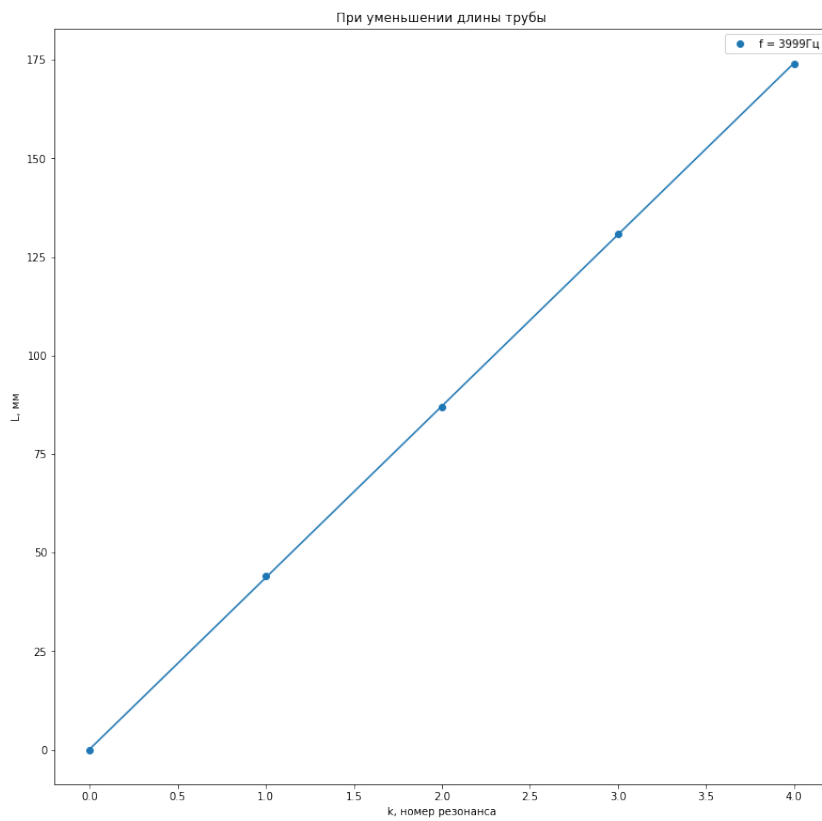
$$\frac{\lambda}{2} = (49.3 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 345.8 \pm 0.5 \text{ м/с}$$



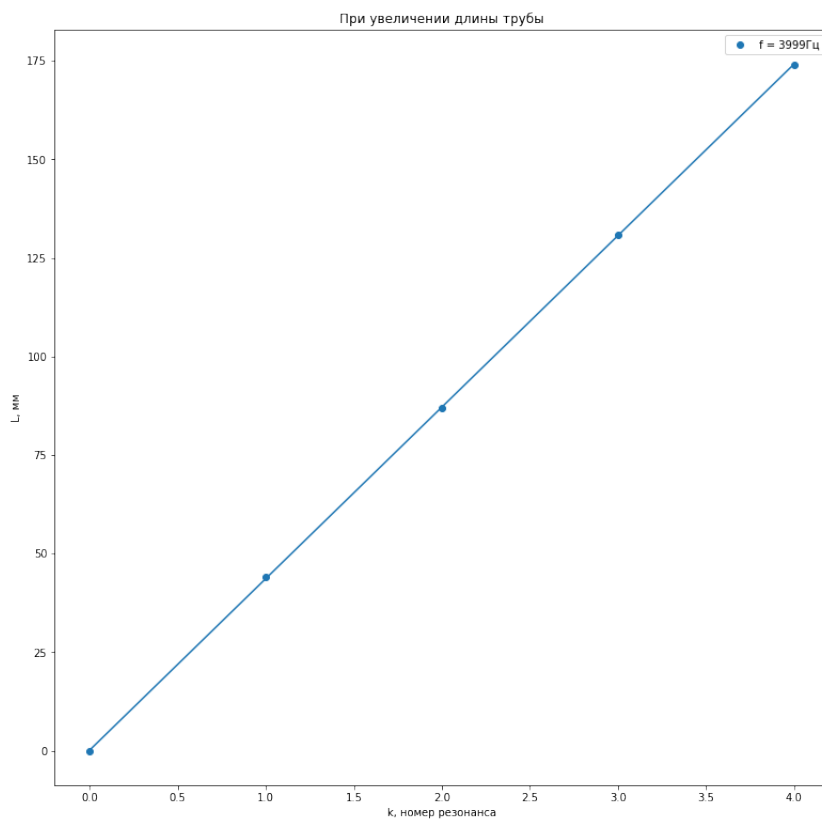
$$\frac{\lambda}{2} = (49.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 345.2 \pm 0.6 \text{ м/с}$$



$$\frac{\lambda}{2} = (43.5 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 347.9 \pm 0.6 \text{ м/с}$$



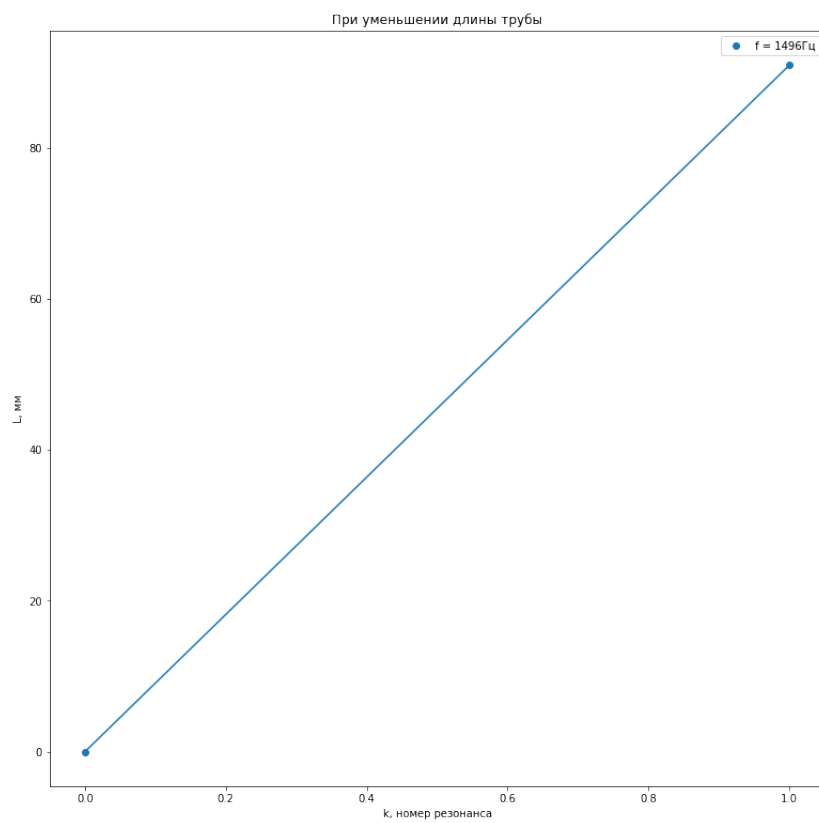
$$\frac{\lambda}{2} = (43.5 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 347.9 \pm 0.6 \text{ м/с}$$

Результаты находятся в согласии, наилучшее значение скорости звука:
 $c = 345.9 \pm 1.3 \text{ м/с}$

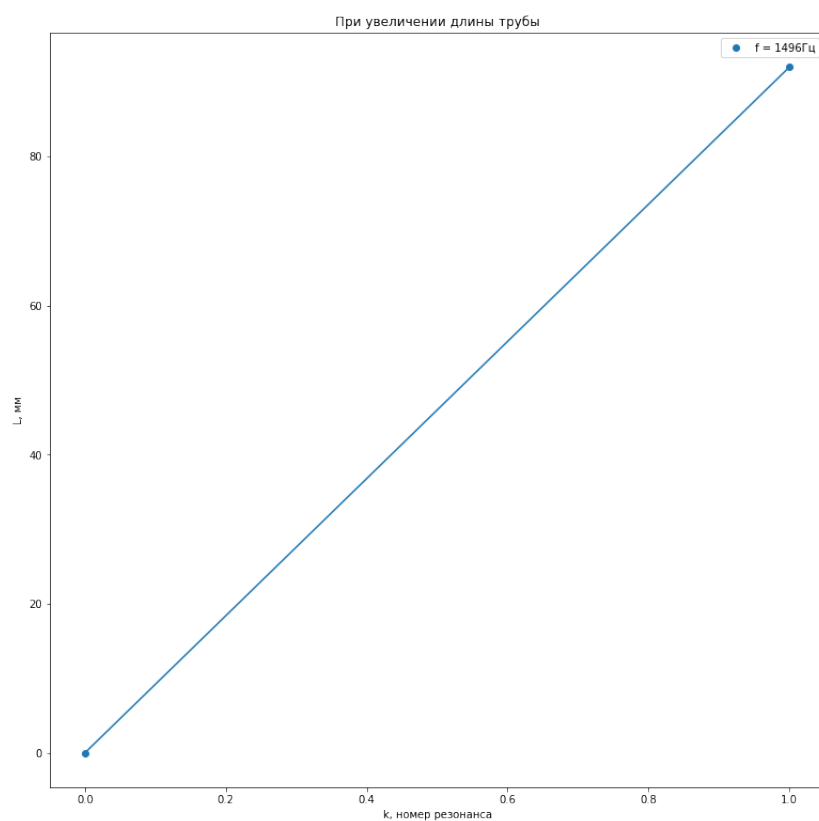
- (d) Измерим скорость звука в углекислом газе. Перед началом измерений продует трубу углекислым газом. Для этого при открытом кране подвижную часть трубы следует несколько раз медленно выдвинуть и затем резко вдвинуть в трубу. Температура газа равна комнатной. Измерять резонансные максимумы нужно при открытом кране CO_2 и при медленных перемещениях подвижной части трубы как внутрь, так и наружу.

L,мм					
f = 1496 Гц					
54		145			
56		148			
f = 2041 Гц					
29	94	161	227		
29	95	161	227		
f = 2551 Гц					
13	66	119		173	223
14	67	120		172	225
f = 3029 Гц					
7	52	96		141	185
8	53	97		140	186
f = 3505 Гц					
9	48	86	126	164	202
10	48	88	125	164	203



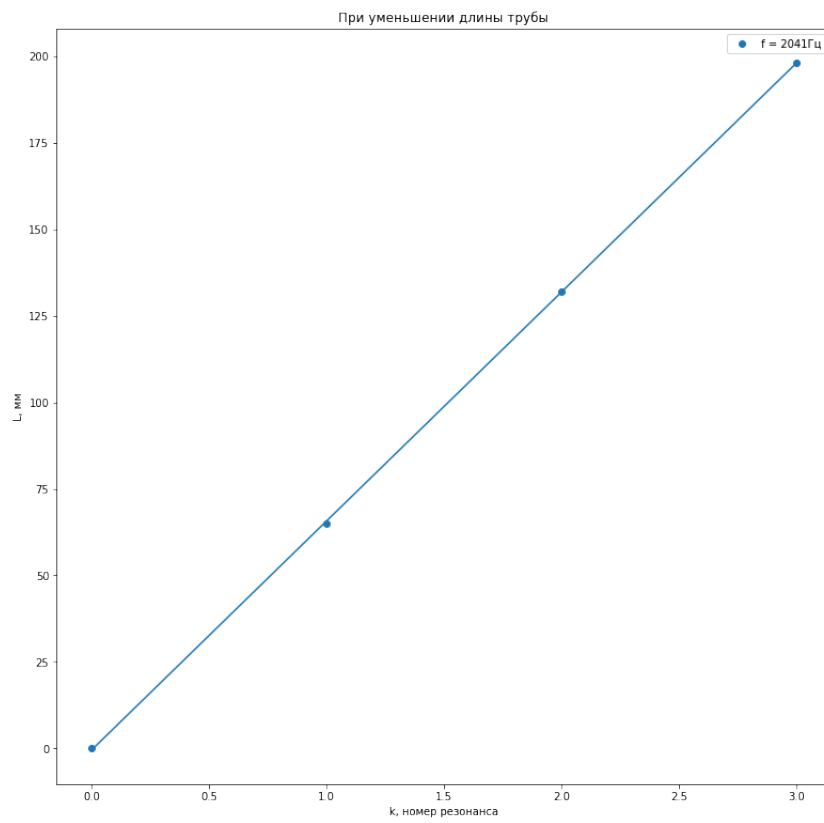
$$\frac{\lambda}{2} = (91.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 272.3 \pm 0.1 \text{ м/с}$$



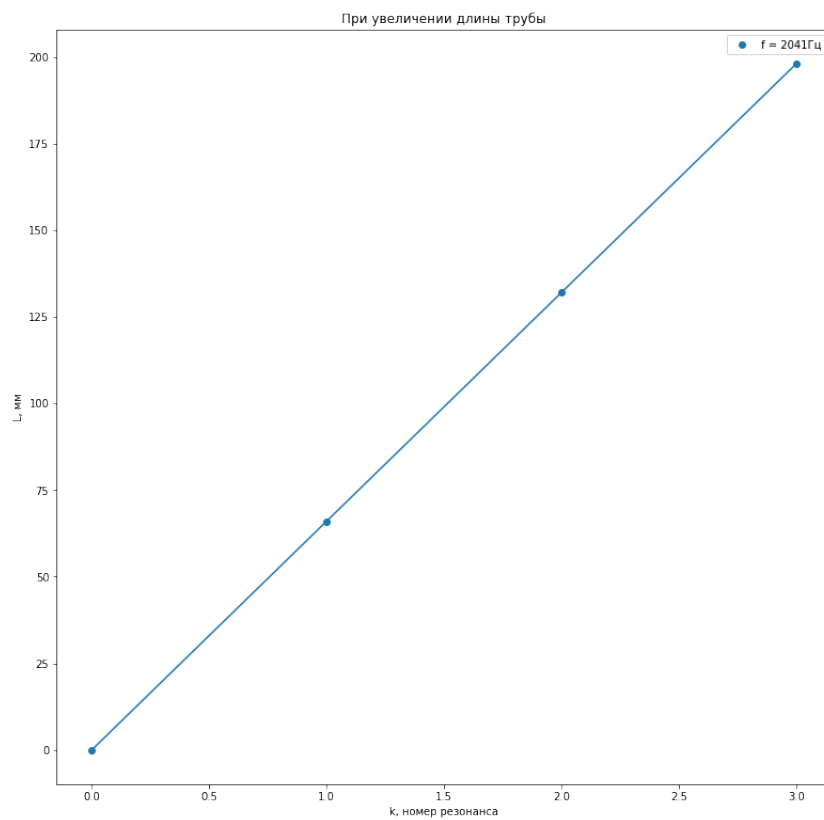
$$\frac{\lambda}{2} = (92.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 275.3 \pm 0.1 \text{ м/с}$$



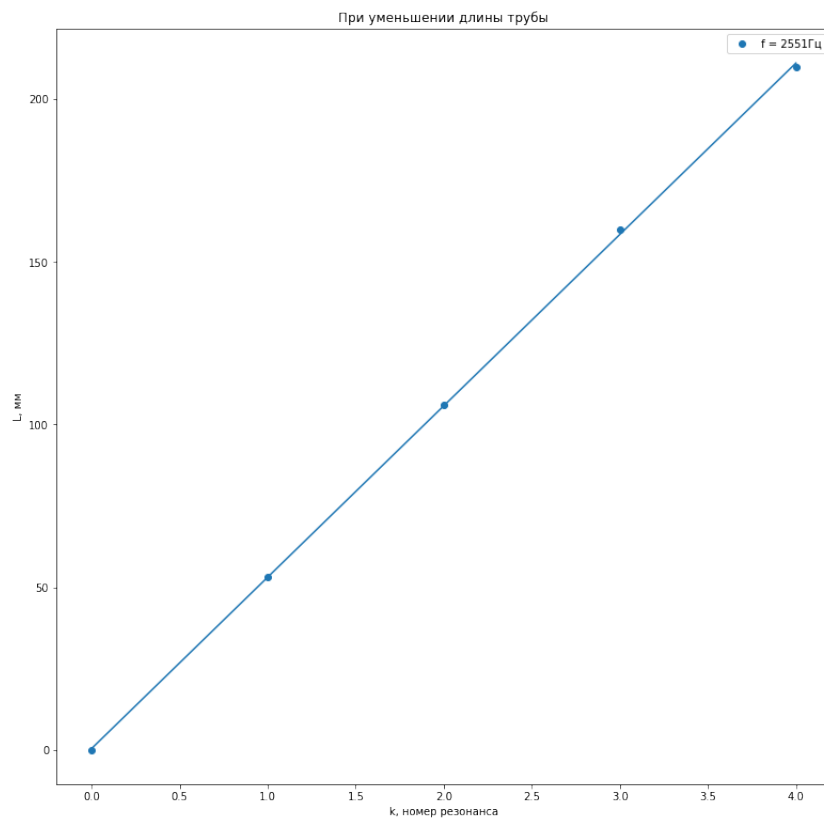
$$\frac{\lambda}{2} = (66.1 \pm 0.2) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 269.8 \pm 0.8 \text{ м/с}$$



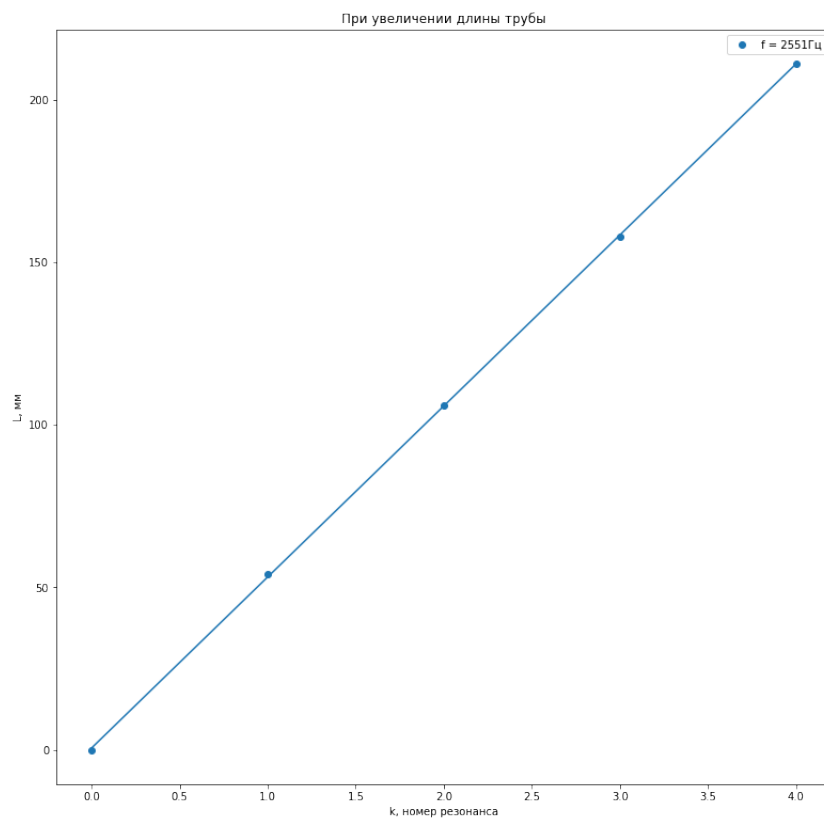
$$\frac{\lambda}{2} = (66.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 269.4 \pm 0.1 \text{ м/с}$$



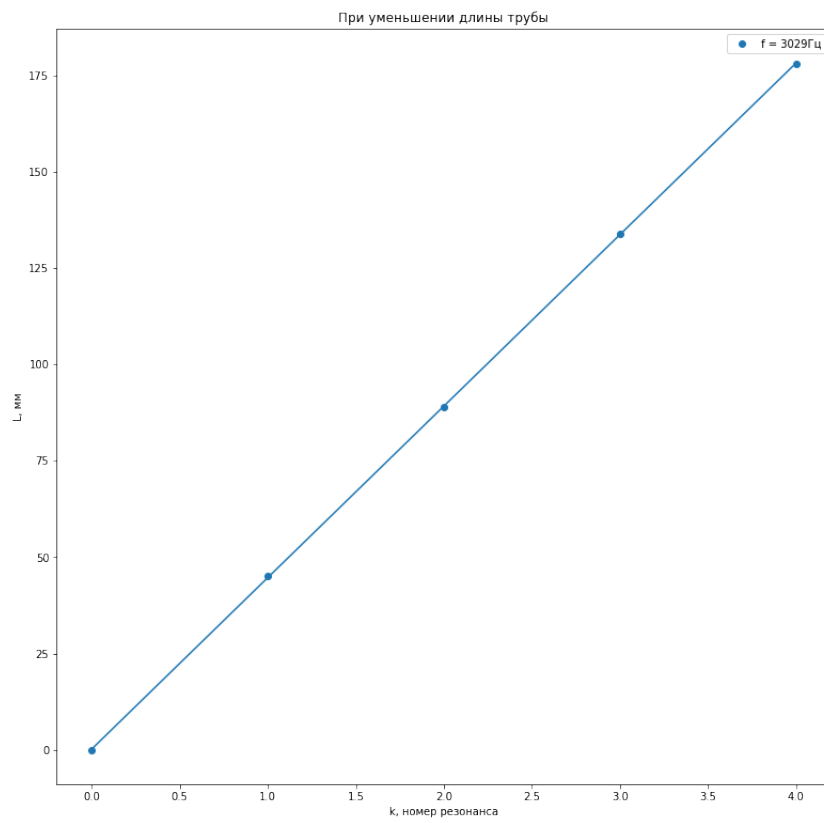
$$\frac{\lambda}{2} = (52.7 \pm 0.3) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 268.9 \pm 1.4 \text{ м/с}$$



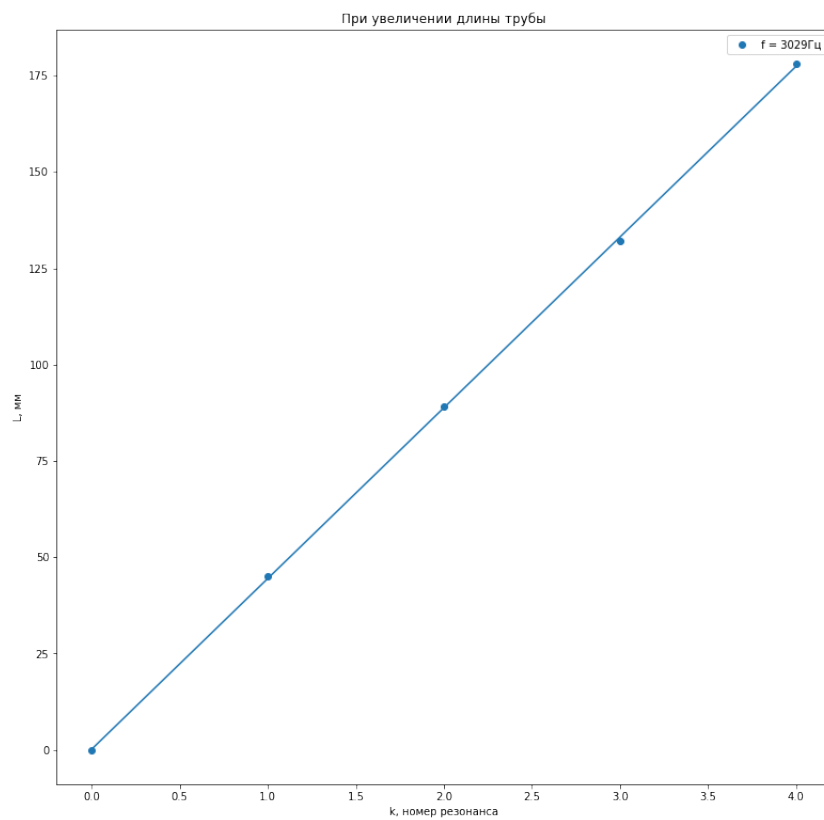
$$\frac{\lambda}{2} = (52.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 268.4 \pm 0.8 \text{ м/с}$$



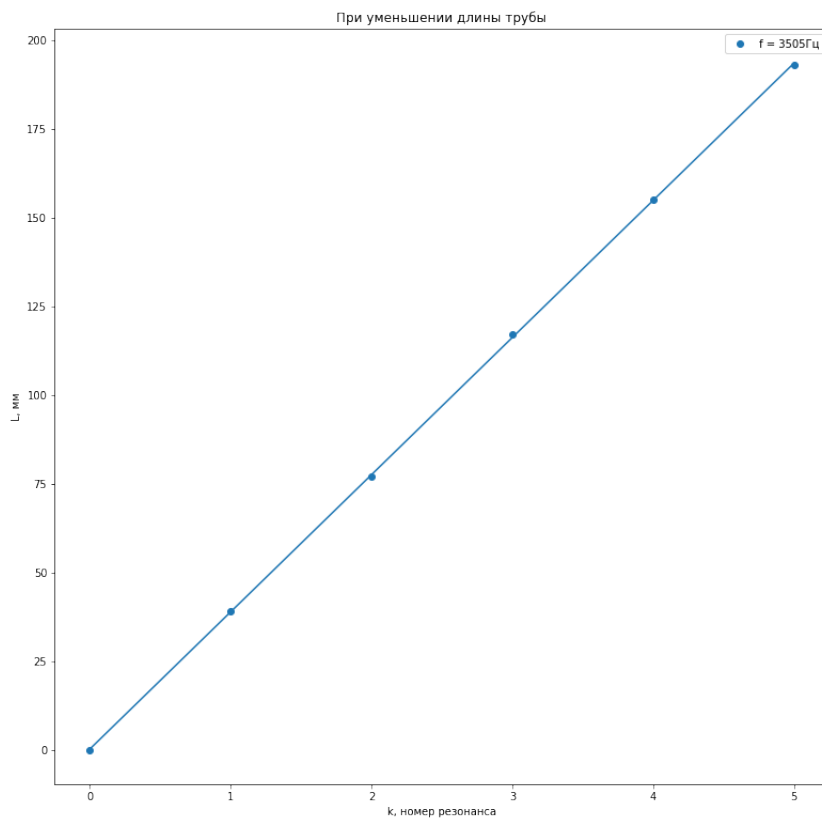
$$\frac{\lambda}{2} = (44.5 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 269.6 \pm 0.5 \text{ м/с}$$



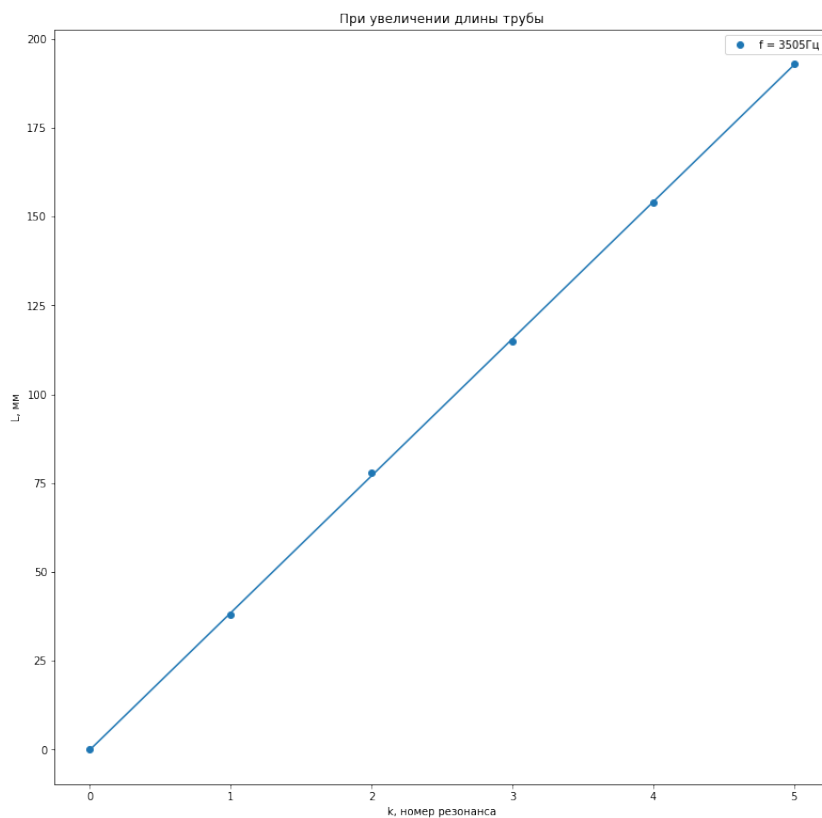
$$\frac{\lambda}{2} = (44.3 \pm 0.2) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 268.4 \pm 1.2 \text{ м/с}$$



$$\frac{\lambda}{2} = (38.7 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 271.0 \pm 0.8 \text{ м/с}$$



$$\frac{\lambda}{2} = (38.6 \pm 0.1) \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$c = 270.4 \pm 0.9 \text{ м/с}$$

Результаты находятся в согласии, наилучшее значение скорости звука:

$$c = 270.3 \pm 0.6 \text{ м/с}$$

4. Измерения на второй установку (рис. 2):

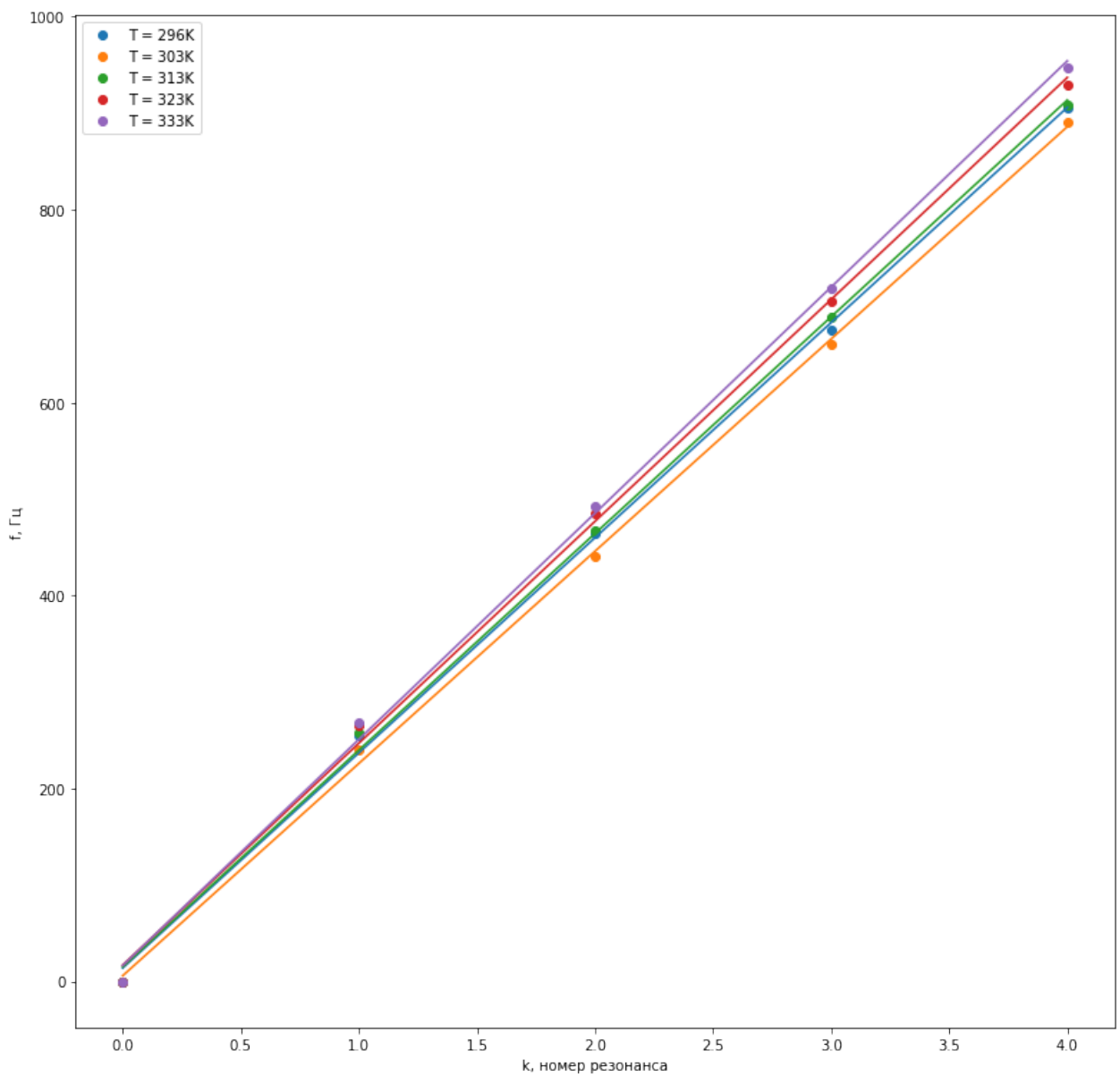
- (а) Измерим скорость звука в трубе постоянной длины. Плавно увеличивая частоту генератора, получим ряд последовательных резонансных значений частоты, отмечая момент резонанса по увеличению амплитуды колебаний на экране осциллографа. Убедимся в повторяемости результатов, производя измерения при уменьшении частоты.

Результаты при повышении и понижении частоты совпадают, ниже приведены их усредненные значения.

f, Гц				
T = 296K				
195	450	660	870	1100
T = 303K				
220	460	660	880	1110
T = 313K				
207	465	675	895	1115
T = 323K				
205	470	690	910	1135
T = 333K				
203	472	695	922	1150

- (b) 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 проведем наилучшую прямую. Угловым коэффициентом прямой определяет величину $c/2L$ (см. формулу (5)). Повторим измерения для различных температур газа. Вычислим значение скорости звука. Оценим ошибку измерений.

- T = 296K :
 $c = 321.2 \pm 4.9$ м/с
- T = 303K :
 $c = 308.0 \pm 3.5$ м/с
- T = 313K :
 $c = 314.4 \pm 4.8$ м/с
- T = 323K :
 $c = 322.0 \pm 5.4$ м/с
- T = 333K :
 $c = 328.2 \pm 5.2$ м.с



5. Вычислим значение $\gamma = C_p/C_v$ по формуле (1). Оценим ошибку измерений.

(a) Для воздуха, на первой установке:

$$\gamma = 1.41 \pm 0.01$$

(b) Для CO_2 , на первой установке:

$$\gamma = 1.30 \pm 0.01$$

(c) Для воздуха, на второй установке:

- T = 296K :
 $\gamma = 1.14 \pm 0.04$
- T = 303K :
 $\gamma = 1.09 \pm 0.03$
- T = 313K :
 $\gamma = 1.10 \pm 0.03$
- T = 323K :
 $\gamma = 1.12 \pm 0.03$
- T = 333K :
 $\gamma = 1.13 \pm 0.04$