

Московский физико-технический институт (Национальный  
исследовательский университет)

Определение скорости звука в газовой среде.

Работу выполнили:

Екатерина Дьякова

Валентина Копышова

Виктория Копытова

Б03-304

Долгопрудный, 2023

## Оглавление

1 Введение.....	3
1.1 Цель.....	3
1.2 Задачи.....	3
2 Теория.....	3
2.1 Термины и определения.....	3
2.2 Физическая система.....	4
2.3 Экспериментальная установка.....	4
3 Программа и методика измерений.....	6
3.1 Методика измерений.....	6
3.2 Программа эксперимента.....	6
4 Обработка данных.....	7
4.1 Методика обработки данных.....	7
4.2 Методика нахождения концентрации углекислого газа.....	7
5 Код программы.....	7
5.1 Скрипт эксперимента.....	7
5.1.1 Скрипт обработки данных.....	10
5.2 Функции.....	12
6 Эксперимент.....	12
6.1 Экспериментальные точки на аналитическом графике.....	12
7 Результаты.....	14
8 Итоги лабораторной работы.....	14

# **1 Введение.**

## **1.1 Цель.**

При помощи осциллографа, двух микрофонов и аналитической модели определить объёмную долю углекислого газа в воздухе, выдыхаемом из лёгких человека.

## **1.2 Задачи.**

1. Подготовить и настроить установку;
2. Измерить температуру и относительную влажность при помощи термогигрометра;
3. Написать аналитическую функцию расчёта скорости звука при заданных температуре и относительной влажности;
4. Измерить скорость звука в воздухе с помощью осциллографа;
5. Измерить скорость звука в воздухе из лёгких с помощью осциллографа;
6. Получить коэффициенты линейной зависимости концентрации углекислого газа от скорости звука;
7. Построить аналитический график зависимости скорости звука при концентрациях углекислого газа от 0% до 5%;
8. По данным с экрана осциллографа определить скорости звука;
9. Определить концентрации углекислого газа в чистом атмосферном воздухе и в воздухе с повышенным содержанием углекислого газа из лёгких с помощью полученных коэффициентов и скорости звука;
10. Нанести полученные значения на график.

# **2 Теория.**

## **2.1 Термины и определения.**

Под волной понимается направленное колебательное возмущение среды. Звуковая волна — продольные колебания давления (плотности) в среде. В данной лабораторной работе исследуются плоские волны, распространяющиеся вдоль одной прямой линии.

Звуковые волны — это распространение малых возмущений в среде (газе, жидкости или твёрдом теле). Скорость распространения волны в такой среде называют скоростью звука.

## 2.2 Физическая система.

Скорость звука  $c$  для идеального газа определяется по формуле:

$$c^2 = \frac{\gamma R T}{M}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — показатель адиабаты, равный отношению теплоёмкости при постоянном давлении к теплоёмкости при постоянном объёме  $C_p/C_v$ ,  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $M$  — молярная масса (кг/моль),  $T$  — температура газа (К).

Для смеси газов необходимо использовать эффективные значения молярной массы и показателя адиабаты

$$M = \sum_{j=1}^N M_j c_j, \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\sum_{j=1}^N M_j C_{pj} c_j}{\sum_{j=1}^N M_j C_{vj} c_j}, \quad (3)$$

где  $M_j$  — молярная масса  $j$ -го компонента,  $C_{pj}$  и  $C_{vj}$  — молярная теплоёмкость при постоянном давлении и постоянном объёме  $j$ -го компонента. Для газов молярные теплоёмкости можно приближенно найти по формулам:

$$C_v = \frac{m}{2} R, \quad (4)$$

$$C_p = \frac{m+2}{2} R, \quad (5)$$

где  $m$  — количество степеней свободы.

## 2.3 Экспериментальная установка.

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 1, а фотографии — на рисунках 2, 3, 4. Основная часть установки – стальная труба квадратного сечения, в стенки которой на расстоянии  $L = 1158$  мм друг от друга вставлены микрофоны и шланг для заполнения трубы выдыхаемым воздухом (с повышенной концентрацией углекислого газа). Микрофоны через усилители и АЦП соединены с процессором осциллографа, снимающим показания с частотой 5 МГц.

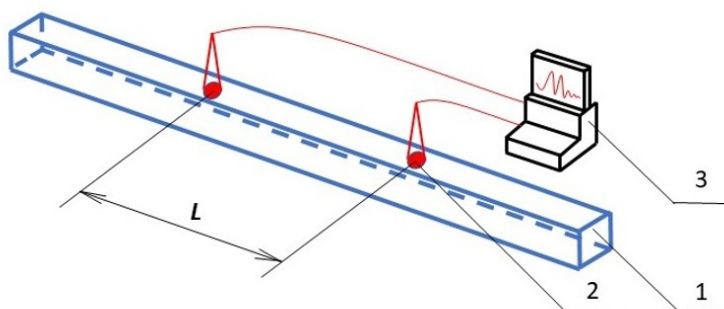


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки, где 1 — труба, 2 — микрофон, 3 — ПК.

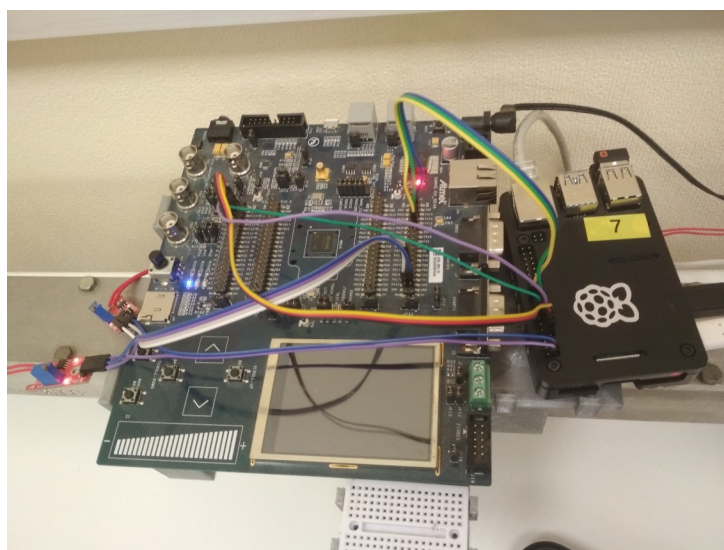


Рис. 2. Процессор осциллографа и АЦП.

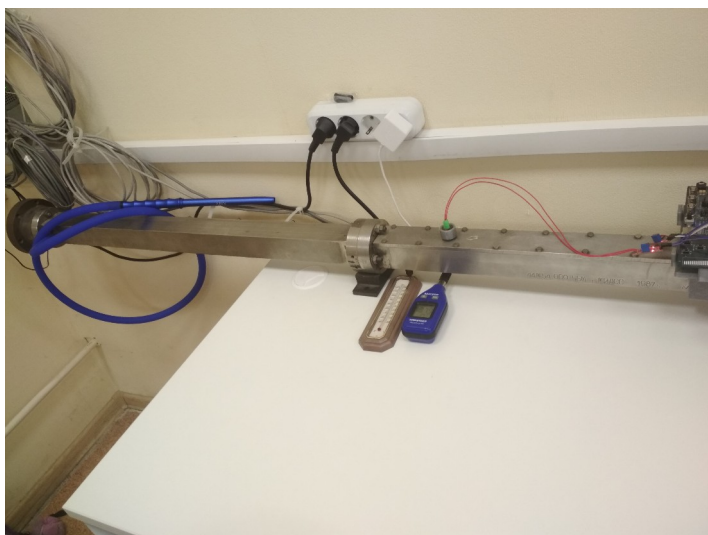


Рис. 3. Часть трубы, шланг для заполнения трубы выдыхаемым воздухом, термометр и термогигрометр.

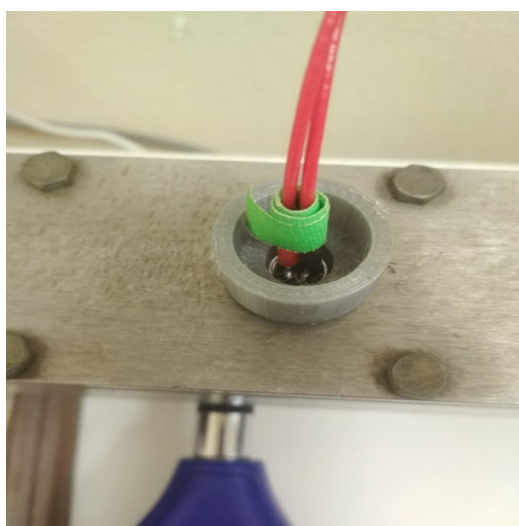


Рис. 4. Микрофон.

### **3 Программа и методика измерений.**

#### **3.1 Методика измерений.**

Модуль RaspberryPi подключён к микроконтроллеру. На вход микроконтроллера подаётся логический ноль, и устанавливается уровень порогового напряжения, до достижения которого измерения не производятся. Как только это значение превышает, начинается запись измерений напряжения на микрофонах. Данные записываются в файл, и по ним строится график зависимости значения напряжения от номера измерения.

## **3.2 Программа эксперимента.**

С помощью термометра и гигрометра измерим температуру и влажность воздуха. Запустим описанную выше программу. Источником звука является хлопок в ладоши у конца трубки. Запустим программу снова и с помощью шланга наполним трубку воздухом из лёгких, обогащённым углекислым газом. Сохраним полученные данные в файлы для дальнейшей работы.

## **4 Обработка данных.**

### **4.1 Методика обработки данных.**

Для обработки данных были выбраны те графики, на которых первые пики наиболее отчётливо идут вверх/вниз.

По полученным данным построены графики зависимости громкости (дБ) от времени (t). На языке Python написана программа, которая эти графики переносит вниз на среднее значение графика до прихода звуковой волны, делит каждый график на его максимальное значение и переносит второй график к первому так, чтобы первые пики совпадали.

Расстояние на графике, на которое был осуществлён перенос, и есть время, за которое волна от первого микрофона доходит до второго.

Графики нормированы и сдвинуты к началу первых пиков. Выбраны графики с самыми чёткими первыми пиками.

### **4.2 Методика нахождения концентрации углекислого газа.**

Из формул (1) - (5) выражена зависимость концентрации углекислого газа от скорости звука, получено квадратное уравнение, зависящее от коэффициента влажности.

Далее с помощью двух кривых, которые можно считать прямыми при малых концентрациях, полученные значения скоростей наложены на теоретические графики, и найдена концентрация.

## 5 Код программы.

### 5.1 Скрипт эксперимента.

Скрипт эксперимента представлен на рисунке 5.

```
import RPi.GPIO as GPIO
import spidev
import matplotlib.pyplot as plt

#####
# Setting up SPI device
# and read function for MCU
#####

spi = spidev.SpiDev()
spi.open(0, 0)
spi.mode = 0b01
spi.max_speed_hz = 5000000

#####
# Setting up GPIO pins for MCU control
#####

GPIO.setmode(GPIO.BCM)

GO_pin = 17
is_sampled_pin = 27
ch_select_pin = 22
is_written_pin = 23
SPI_CS = 8

GPIO.setup(GO_pin, GPIO.OUT)
GPIO.setup(is_sampled_pin, GPIO.IN)
GPIO.setup(ch_select_pin, GPIO.OUT)
GPIO.setup(is_written_pin, GPIO.IN)
GPIO.setup(SPI_CS, GPIO.OUT)

GPIO.output(GO_pin, 0)
GPIO.output(SPI_CS, 1)
```



```
#####
# Actual measuring script
#####

try:
    data = [[] for _ in range(2)]

    # GO command to MCU
    GPIO.output(GO_pin, 1)

    # Waiting for sampling to be done
    while not GPIO.input(is_sampled_pin):
        continue

    # Reading from channels
    for ch in range(2):
        GPIO.output(ch_select_pin, ch)

        while GPIO.input(is_written_pin):
            continue
        while not GPIO.input(is_written_pin):
            sample = spi.read()
            data[ch].append(sample)

    # Cancelling GO command to MCU
    GPIO.output(GO_pin, 0)

    # Showing and saving samples
    data[0].pop(0)
    data[1].pop(0)

    plt.plot(data[0]) # blue
    plt.plot(data[1]) # orange

    write_list(data[0], 'data_0.txt')
    write_list(data[1], 'data_1.txt')

    plt.show()

finally:
    GPIO.output(GO_pin, 0)
    GPIO.cleanup()
    spi.close()
```

Рис. 5. Скрипт эксперимента.

### 5.1.1 Скрипт обработки данных.

Ниже представлен текст скрипта для нахождения концентрации углекислого газа в атмосферном воздухе:

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from matplotlib.ticker import AutoMinorLocator, MultipleLocator
def speedOfSound_experiment(data_0, data_1):
    #rcgthbvtynfkmyfz crjhjcnm
    SamplingRate = 500000 # Частота дискретизации
    L = 1.158 # расстояние между микрофонами
    max_ob0 = max(data_0)
    max_ind0 = data_0.index(max_ob0)
    max_ob1 = max(data_1)
    max_ind1 = data_1.index(max_ob1)
    #print(max_ind0 , max_ind1) t = (abs((max_ind1 — max_ind0))/SamplingRate)
    return (L / t)
def speedOfSound_theory(temp, fi):#теоретическое значение скорости звука
    # H2O N2+O2+Ar CO2
    Mi = [0.01801, 0.02897, 0.04401] #молярная масса
    Cpi = [1.863, 1.0036, 0.838]
    Cvi = [1.403, 0.7166, 0.649]
    R = 8.314
    array_a = []
    array_x = []
    x = 0 # Концентрация CO2
    for i in range(0, 100):
        x += 0.001
        M = ( fi * (Mi[0]-Mi[1]) + x * (Mi[2]-Mi[1]) + Mi[1] )
        Y = ( fi * (Mi[0] * Cpi[0] - Mi[1] * Cpi[1]) + x * (Mi[2] * Cpi[2] - Mi[1] * Cpi[1]) +
        Mi[1] * Cpi[1] ) / ( fi * (Mi[0] * Cvi[0] - Mi[1] * Cvi[1]) + x * (Mi[2] * Cvi[2] - Mi[1] * Cvi[1]) +
        Mi[1] * Cvi[1] )
        a = ( Y * R * temp / M ) ** 0.5
        array_a.append(a)#скорость при текущей концентрации
```

```

        array_x.append(x*100)#концентрация
    return array_a, array_x
def grafics(x, y, a):
    x = np.array(x)
    y = np.array(y)
    fig, ax = plt.subplots()
    ax.plot(x, y, label="Аналитическая зависимость", marker="", linestyle="-", color='r',
linewidth=1)
    array_a_get = []
    ax.plot(1.7, a, label="Значение в воздухе: 378.9 [м/с], [%]", marker="*", linestyle="",
color='green', linewidth=1)
    ax.grid(which = "major", linewidth = 1)
    ax.grid(which = "minor", linewidth = 0.2)
    ax.minorticks_on() plt.text(0, 358, 'Влажность составляет 41,9 %\nТемпература
составляет 25,3 по Цельсии', bbox={"facecolor": "white", "edgecolor": "black"}, size=7)
    plt.xlabel("Концентрация CO2 [%]", size=10) plt.ylabel("Скорость звука [м/с]", size=10)
    plt.legend()
    plt.show()
    # Сохраним график
    fig.savefig('SoundSpeedair.png'dpi=600)
# наши параметры
temp = 25.3
temp += 273 # в Кельвинах
f1 = 41.9
f1 /= 100
# считываем данные
with open ("data_0__air2.txt", 'r') as file:
    data_0__air = []
    for f in file:
        data_0__air.append(f.split()[0])
with open ("data_1__air2.txt", 'r') as file:
    data_1__air = []
    for f in file:
        data_1__air.append(f.split()[0])

```

```

a_air = speedOfSound_experiment(data_0_air[500:], data_1_air[500:])
print('Скорость звука в равна ', a_air, 'м/с')
array_a, array_x = [], []
array_a, array_x = speedOfSound_theory(temp, fi)
grafics(array_x, array_a, a_air)

```

Используя набор данных, полученных в процессе эксперимента, получим аналитические зависимости скорости звука от концентрации углекислого газа в трубке.

## 5.2 Функции.

Функции эксперимента представлены на рисунке 6.

```

def spi_read():
    GPIO.output(SPI_CS, 0)
    resp = spi.xfer2([0, 0])
    GPIO.output(SPI_CS, 1)
    return resp[0] << 8 | resp[1]

#####
# Defining the write function
# for saving samples
#####

def write_list(arr, file_name):
    arr_str = list(map(str, arr))
    with open(file_name, 'w') as file:
        file.write('\n'.join(arr_str))

```

Рис.6. Функции эксперимента.

## 6 Эксперимент.

### 6.1 Экспериментальные точки на аналитическом графике.

Графики, полученные в ходе эксперимента, представлены на рисунках 7 и 8.

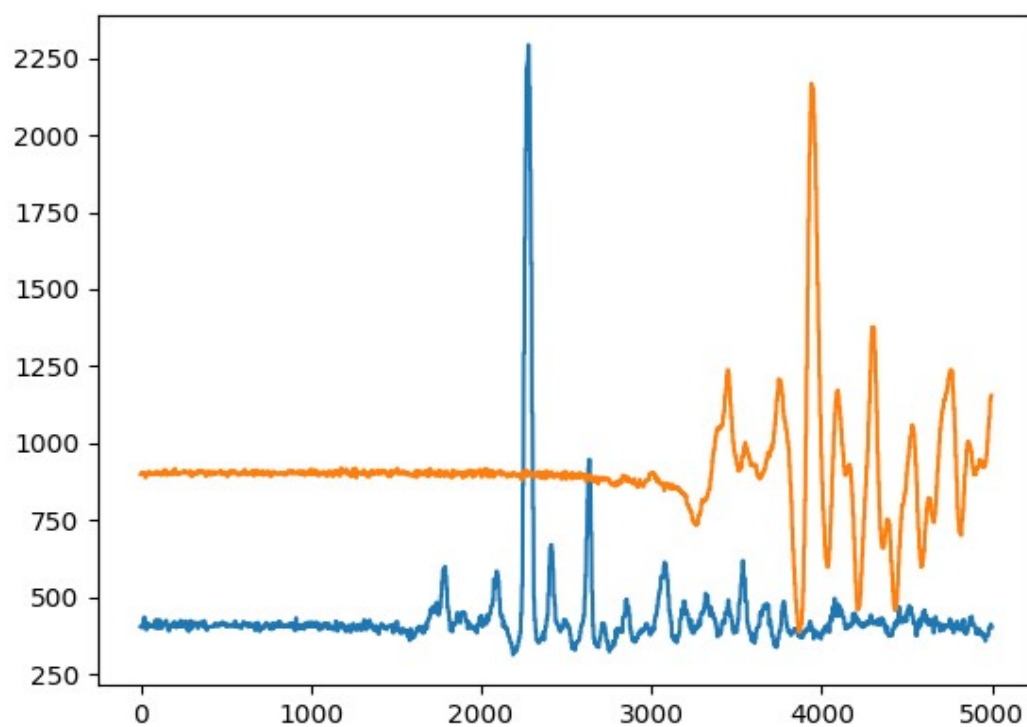


Рис.7. График зависимости напряжения (В) от номера измерения для атмосферного воздуха.

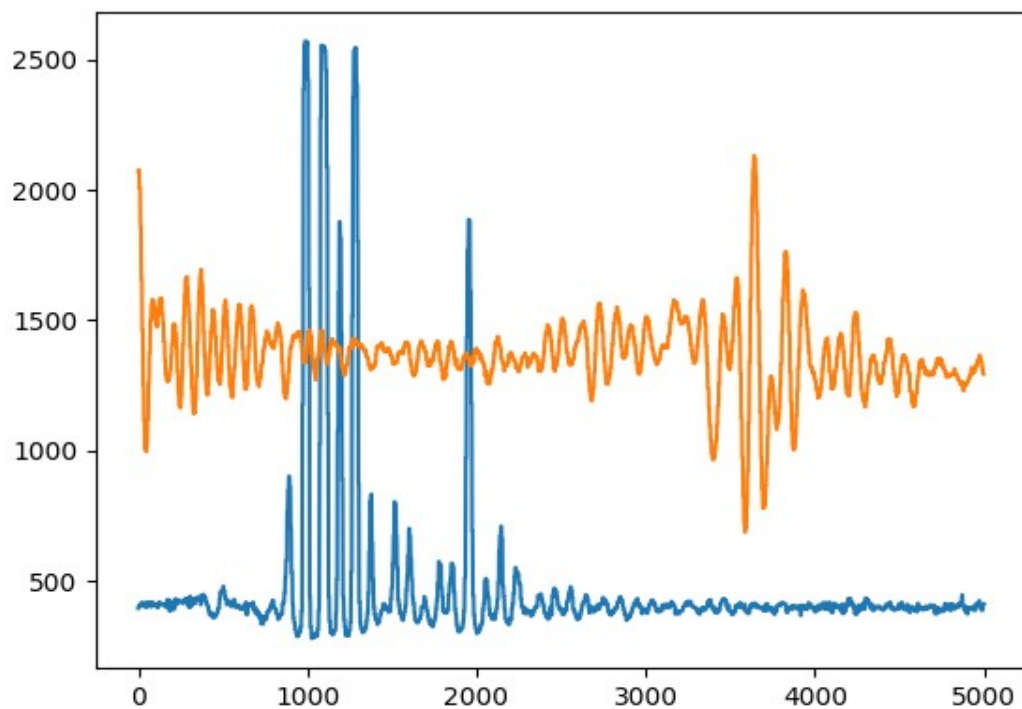


Рис.8. График зависимости напряжения (В) от номера измерения для воздуха из лёгких.

## 7 Результаты.

График зависимости скорости звука от концентрации углекислого газа в атмосферном воздухе представлен на рис.9.

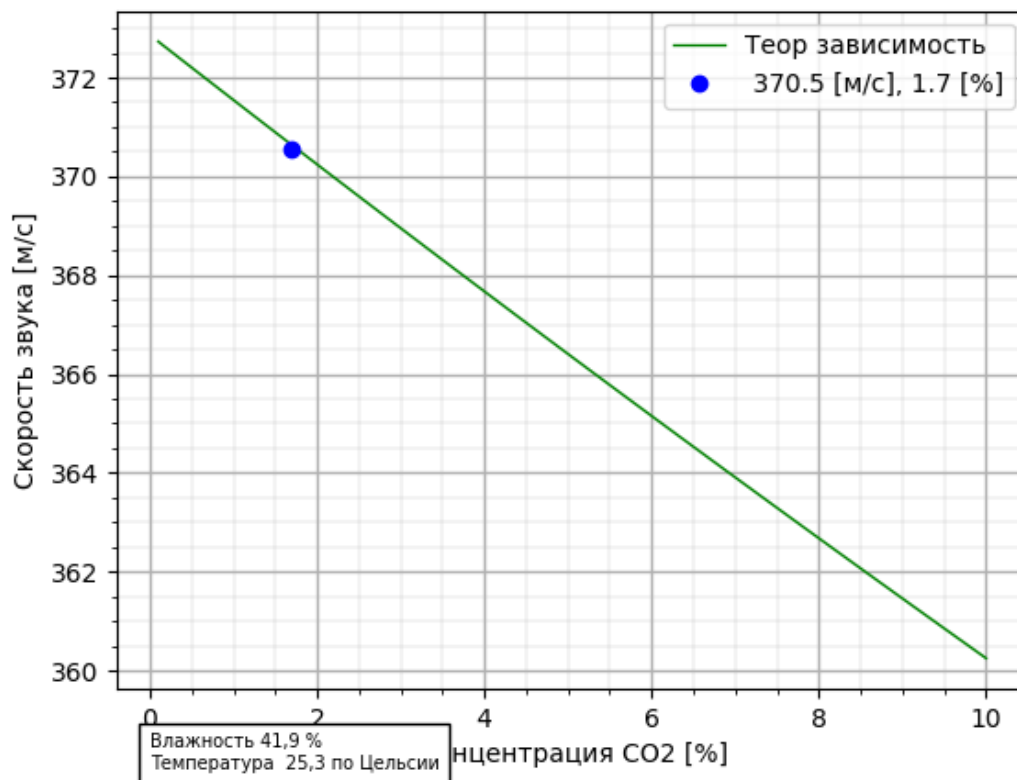


Рис. 9. Зависимость скорости звука от концентрации CO<sub>2</sub> (чистый воздух).

График зависимости скорости звука от концентрации углекислого газа в воздухе, наполненном углекислым газом из лёгких, представлен на рис. 10.

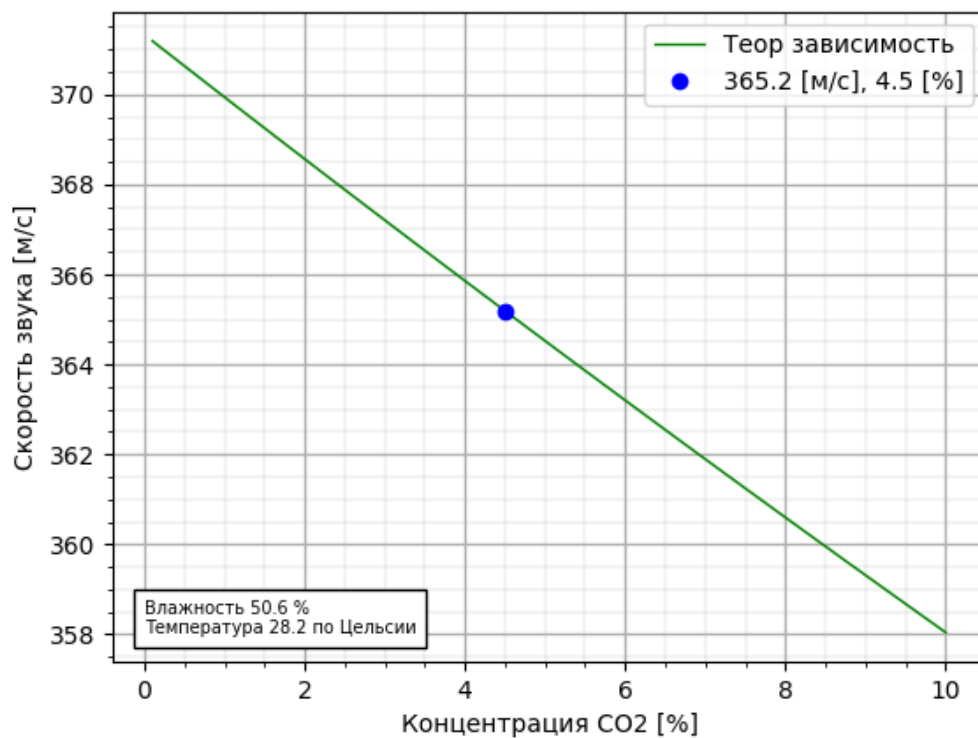


Рис. 10. Зависимость скорости звука от концентрации CO<sub>2</sub> (воздух с примесью).

## 8 Итоги лабораторной работы.

Мы написали аналитическую функцию расчёта скорости звука при заданных температуре и относительной влажности, измерили скорость звука в чистом воздухе и в воздухе, обогащённом CO<sub>2</sub>, с помощью осциллографа, который состоит из расчётной программы, микроконтроллера и модуля Raspberry. Были построены графики, по которым мы определили объёмную долю углекислого газа в чистом воздухе и в воздухе, выдыхаемом из лёгких человека.