

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа аэрокосмических технологий
ФАКТ



Лабораторная работа № 5

Скорость звука в воздухе

Авторы:
Захаржевский Марк
Платонов Никита
Стречин Галина
Вострикова Станислава
Б03-104

Долгопрудный, 2021 г.

Содержание

1	Введение	2
1.1	Теория	2
1.2	Экспериментальная установка и методика	5
2	Результаты эксперимента	8
2.1	Экспериментальные данные	8
2.2	Аналитическая зависимость	8
3	Обработка данных	10
4	Выводы	13

1 Введение

Цель работы: Исследование зависимости скорости звука от концентрации углекислого газа методом измерения времени между считыванием возмущения двумя микрофонами в трубе при известном между ними расстоянии с помощью осциллографа для определения скорости звука.

В работе используются: герметичная труба с 3 отверстиями для установки 2 микрофонов и для создания возмущения, 2 микрофона, осциллограф Tektronix TDS 3054S, макетная плата для соединения элементов, 2 макетные платы для передачи электрического сигнала микрофона на осциллограф, Raspberry Pie 4 model B для питания микрофонов и сохранения показаний осциллографа, герметичная трубка и мундштук для изменения состава смеси воздуха.

В данной работе исследуется зависимость скорости звука в зависимости от состава воздуха. Для изучения используется фиксирование времени между считыванием звуковой волны микрофонами на фиксированном расстоянии при различном составе воздуха. Погрешность связана с тем, что использованные табличные данные были вычислены для температуры 20 °C, так же не учитывается изменение температуры и объемной доли других газов при изменении концентрации углекислого газа. Основная цель данной работы — изучить поведение скорости звука в зависимости от доли углекислого газа в воздухе.

1.1 Теория

Скорость звука — скорость распространения малых возмущений в различных средах. Основные параметры, функцией от которых является скорость звука, это состав среды, упругость и плотность среды, температура среды (особенно в случае газовой среды), в случае твердой среды в виде кристалла - от направления возмущения. Обычно скорость звука считают независимой от характеристик волны (амплитуды и частоты), то есть дисперсия звука не учитывается и изучается отдельно. В рамках данной работы рассматривается скорость звука в газах.

В газообразной и жидкой среде распространяются только продольные возмущения, так как газы и жидкости обладают только объемной упругостью.[1] Газ не может существовать не под давлением, так как иначе газ перетерпевал бы расширение. Представим, что газ заключен в прямолинейную трубу постоянного сечения. Обозначим давление внутри газа в невозмущенном состоянии как P_0 . При приращении давления внутри газа $P = P_0 + \Delta P$ изменится объем рассматриваемой массы газа. Будем считать, что $\Delta P \ll P_0$. Если газ заключен в трубе, одним концом которой является подвижный поршень, то при изменении давления на поршень на ΔP длина газового столба изменится на Δl . При малых сжатиях $\Delta P = -A \frac{\Delta l}{l}$, где A - постоянная, l - длина газового столба. Используя формулу для стержня, можно записать, что $\Delta P = -E \frac{\Delta(\Delta l)}{l}$, где $\Delta(\Delta l)$ - приращение длины стержня при изменении давления на ΔP , что аналогично Δl для газа. Поэтому:

$$\Delta P = -E \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

Так как длина газового столба пропорциональна его длине, формулу (1) можно переписать в следующем виде, сохраняющем смысл для любых форм сосуда:

$$\Delta P = -E \frac{\Delta V}{V} = E \left(-\frac{\Delta V}{V} \right) \quad (2)$$

Для начала будем считать, что давление газа является функцией только его объема (происходят только *изотермические* процессы), тогда для малых изменений объема $\Delta P = \Delta V \frac{dP}{dV}$ или:

$$\Delta P = (-V \frac{dP}{dV})(-\frac{\Delta V}{V}) \quad (3)$$

Сравнивая формулы (2) и (3), можно сделать вывод, что роль *модуля Юнга для газов* выполняет следующая величина E:

$$E = -V \frac{dP}{dV} \quad (4)$$

При отсутствии потерь массы величина $m = V\rho = const$, где V - объем объекта, ρ - плотность объекта. Тогда путем дифференцирования находим $\frac{dV}{V} = -\frac{d\rho}{\rho}$, отсюда следует:

$$E = \rho \frac{dP}{d\rho} \quad (5)$$

Подставляя формулу (5) в формулу скорость распространения упругих возмущений ($c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$), получаем:

$$c = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}} \quad (6)$$

Впервые формула (6) была применена Ньютоном для расчета скорости звука в газах[1]. Если считать, что изменения давления и плотности газа подчиняются закону Бойля - Мариотта (то есть все процессы *изотермические*), то $P = A\rho$, где A - константа, отсюда $\frac{dP}{d\rho} = A = \frac{P}{\rho}$. В результате получается *формула Ньютона*:

$$c_n = \sqrt{\frac{P}{\rho}} \quad (7)$$

Формулу (7) можно преобразовать в более удобный для численных вычислений вид, используя *уравнение идеального газа*, где P - давление газа, V - объем газа, T - температура газа, R - универсальная газовая постоянная, равная $8.31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ в системе СИ:

$$PV = RT \quad (8)$$

Зная, что $\rho = \frac{\mu}{V}$ для газа, где μ - молярная масса, V - объем, получаем:

$$P = \rho \frac{RT}{\mu} \quad (9)$$

$$c_n = \sqrt{\frac{RT}{\mu}} \quad (10)$$

По формуле Ньютона скорость звука для воздуха (принятого как смесь азота и кислорода $\approx 80/20$, $\mu_{\text{азота}} \approx 28$, $\mu_{\text{кислорода}} \approx 32$, $\mu_{\text{воздуха}} \approx 28.8$) при температуре $T = 273K$ получается $c_n \approx 280 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Измеренное до этого значение скорости воздуха - $330 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, расхождение связано с тем, что звуковая волна состоит из следующих друг за другом сжатий и разрежений газа, над сжатыми областями производится работа, идущая на повышение температуры, разреженные области совершают работу и охлаждаются.

Давление газа является функцией и температуры, и объема. При выводе формулы Ньютона использовалось предположение, что в качестве $\frac{dP}{d\rho}$ бралась частная производная $(\frac{\delta P}{\delta \rho})_T$. Однако Лаплас показал, что колебания плотности и возникающие из-за них колебания температуры происходят настолько быстро, что с учетом низкой теплопроводности воздуха теплообменом с окружающей средой можно пренебречь[2]. Поэтому распространение звука можно считать адиабатическим процессом. *Уравнение адиабаты:*

$$\gamma PdV + VdP = 0 \quad (11)$$

где $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$, (где C_P - теплоемкость при постоянном давлении, C_V - теплоемкость при постоянном объеме).

Если в уравнение (11) внести вместо объема V плотность ρ , пропорциональную $\sim \frac{1}{V}$, то оно перейдет в:

$$\gamma P d\rho - \rho dP = 0 \quad (12)$$

Из уравнения (12) можно вывести частную производную $(\frac{\delta P}{\delta \rho})_{\text{адиабата}}$:

$$\frac{dP}{d\rho} = (\frac{\delta P}{\delta \rho})_{\text{адиабата}} = \gamma \frac{P}{\rho} = \gamma (\frac{\delta P}{\delta \rho})_T \quad (13)$$

И из уравнения (13) и уравнения (6) получается **формула Лапласа**:

$$c_L = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}} = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}} = \sqrt{\gamma} c_n \quad (14)$$

Формула Лапласа дает величину, большую формулы Ньютона в $\sqrt{\gamma}$ раз. Измерения величины $\gamma_{\text{воздух}}$ привели к значению $\gamma_{\text{воздух}} \approx 1.4$. Поэтому согласно формуле Лапласа для воздуха при температуре $T = 273K$ скорость воздуха должна быть:

$$c_L = c \approx 280 * \sqrt{1.4} \approx 330 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Изменение давления для звуковых волн оценивается в децибелах и измеряется по следующей формуле:

$$L = 20 * \log_{10} \frac{P}{P_0} \text{ дБ} \quad (15)$$

где P - фактический уровень звукового давления, P_0 - опорный звуковой уровень, обычно для изучения звуковых волн принимается равным порогу слышимости человека ($2 * 10^{-5}$ Па).

Воздух представляет собой смесь различных газов. Стандартно принимаются следующие соотношения: 78.1% объема азота, 21 % объема кислорода, 0.9 % объема аргона. Количество водяного пара зависит от конкретных условий, в среднем составляет 1 % объема. Количество углекислого газа обычно варьируется в пределах 0.03% объема (стандартная атмосфера) до 1 % объема. Смесь азота, кислорода и аргона можно считать за 1 газ, так как их объемные доли изменяются мало.

Молярная масса для смеси газов:

$$\mu = \sum_{i=1}^n \mu_i x_i \quad (16)$$

где n - количество компонентов смеси, μ_i - молярная масса компонента смеси, x_i - объемная/молярная доля компонента смеси ($\sum_{i=1}^n x_i = 1$).

Принимая модель идеального газа, можно сделать вывод, что показатель адиабаты для смеси газов можно вычислить по формуле:

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i C_{P,i} x_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i C_{V,i} x_i} \quad (17)$$

Для аналитического исследования зависимости скорости звука от состава воздуха необходимы следующие табличные данные:

газ	μ , г	$C_P^{20^\circ C}$	$C_V^{20^\circ C}$
$N_2 + O_2 + Ar$	28.97	1.0036	0.7166
H_2O	18.01	1.863	1.403
CO_2	44.01	0.838	0.649

1.2 Экспериментальная установка и методика

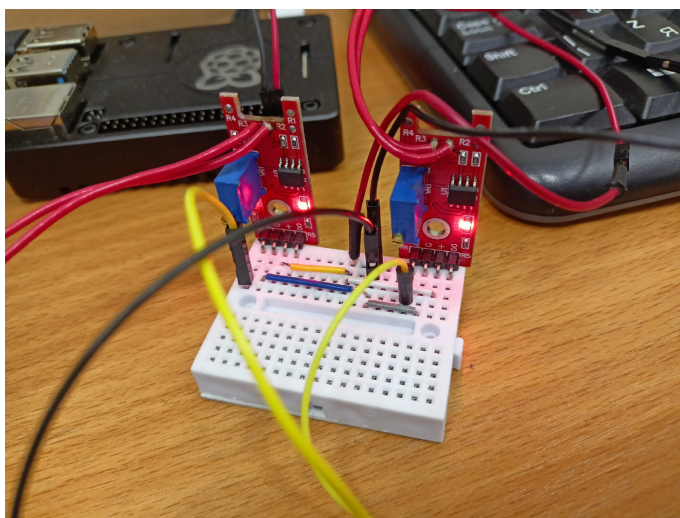


Рис. 1: Подсоединение осциллографа к Raspberry Pie

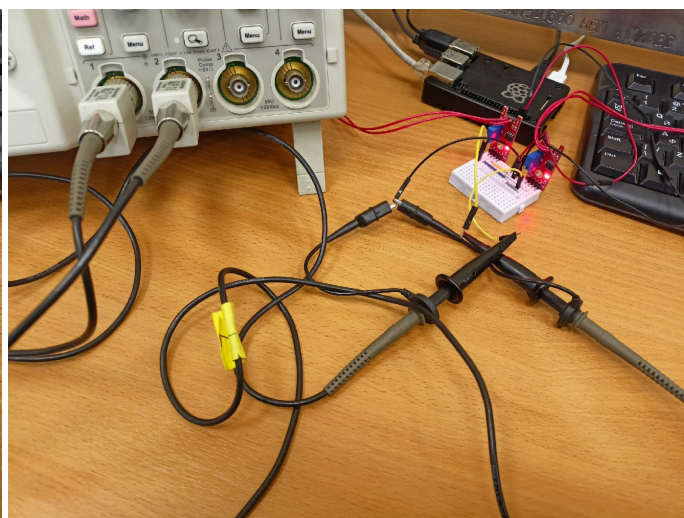


Рис. 2: Подсоединение микрофонов к осциллографу



Рис. 3: Используемый в работе осциллограф



Рис. 4: Используемый в работе термогигрометр

Порядок работы:

1. Подготовить лабораторную установку - вставить микрофоны в трубу, включить осциллограф, подключить осциллограф к сети Ethernet, включить Raspberry Pi
2. Подключить осциллограф к микрофонам и к Raspberry Pi
3. Настроить осциллограф для снятия сигнала микрофонов
4. Подготовить скрипт на языке Python для сохранения показаний осциллографа
5. Проверить работу установки путем создания возмущения и верификации полученного сигнала путем визуального наблюдения экрана осциллографа
6. Зафиксировать показания термогигрометра
7. Снять сигнал, считываемый микрофонами при создании возмущения у открытого конца трубы в виде хлопка
8. Изменить состав смеси воздуха в трубе с использованием магнита для обеспечения герметичности открытого конца трубы и гибкой трубки с мундштуком для нагона воздуха, прошедшего циклы внутриклеточного дыхания и содержащего повышенную объемную долю углекислого газа
9. Вычислить скорость звука через показания осциллографа (график зависимости напряжения сигнала от времени), зная расстояние между микрофонами
10. Используя теоретическое введение, вывести аналитическую формулу зависимости скорости воздуха от объемной доли углекислого газа в данных условиях
11. Определить объемную долю углекислого газа в рассмотренных случаях (труба без нагонного воздуха легких с повышенным содержанием углекислого газа и с нагнанным воздухом легких)

Микрофоны были подсоединены к осциллографу таким образом, чтобы канал 1 осциллографа показывал сигнал первого микрофона, расположенного ближе к открытому концу трубы, канал 2 показывал сигнал второго микрофона. Расстояние между микрофонами - 1158 мм. Так как микрофоны идентичности, разницу во времени между фиксированием пика сигнала первым и вторым микрофоном можно считать временем, за которое звуковое колебание распространилось/прошло данное расстояние, и отношение расстояния между микрофонами к этому времени будет с необходимой точностью соответствовать скорости звука в данной среде.

С помощью скрипта на языке Python на осциллограф отправляется GET запрос, ответом на который будет являться экран осциллографа. Осциллографом можно снять серию сигнала с помощью настроенного триггера напряжения для запуска съемки серии, серия будет содержать изображение сигнала 2 каналов 2 микрофонов и настройки осциллографа - градуировку по напряжению, градуировку по времени и тд. Время между пиками сигнала можно определить с помощью выставления курсоров на 2 пиках и автоматическим подсчетом осциллографом разницы во времени или с помощью определения расстояния в элементах изображения между элементами изображений максимума пиков по горизонтали и определения разницы во времени, соответствующей одному элементу изображения.

Возмущение было создано хлопком у открытой трубы, затем была снята серия измерения. Первое измерение было проведено в трубе без изменений состава смеси воздуха внутри, приблизительно соответствующему комнатному. Показания термогигрометра - 31.4 % влажности и 23.3 °C. Затем была обеспечена относительная герметичность трубы и с помощью гибкой трубки и

мундштука был изменен состав воздуха - был нагнан воздух из легких в течение 2 итераций. После чего "заглушка" из магнита, использованная для обеспечения герметичности при закрытии открытого конца трубы, была убрана и было создано возмущение хлопком, осциллографом были зафиксированы сигналы 2 микрофонов.

2 Результаты эксперимента

2.1 Экспериментальные данные

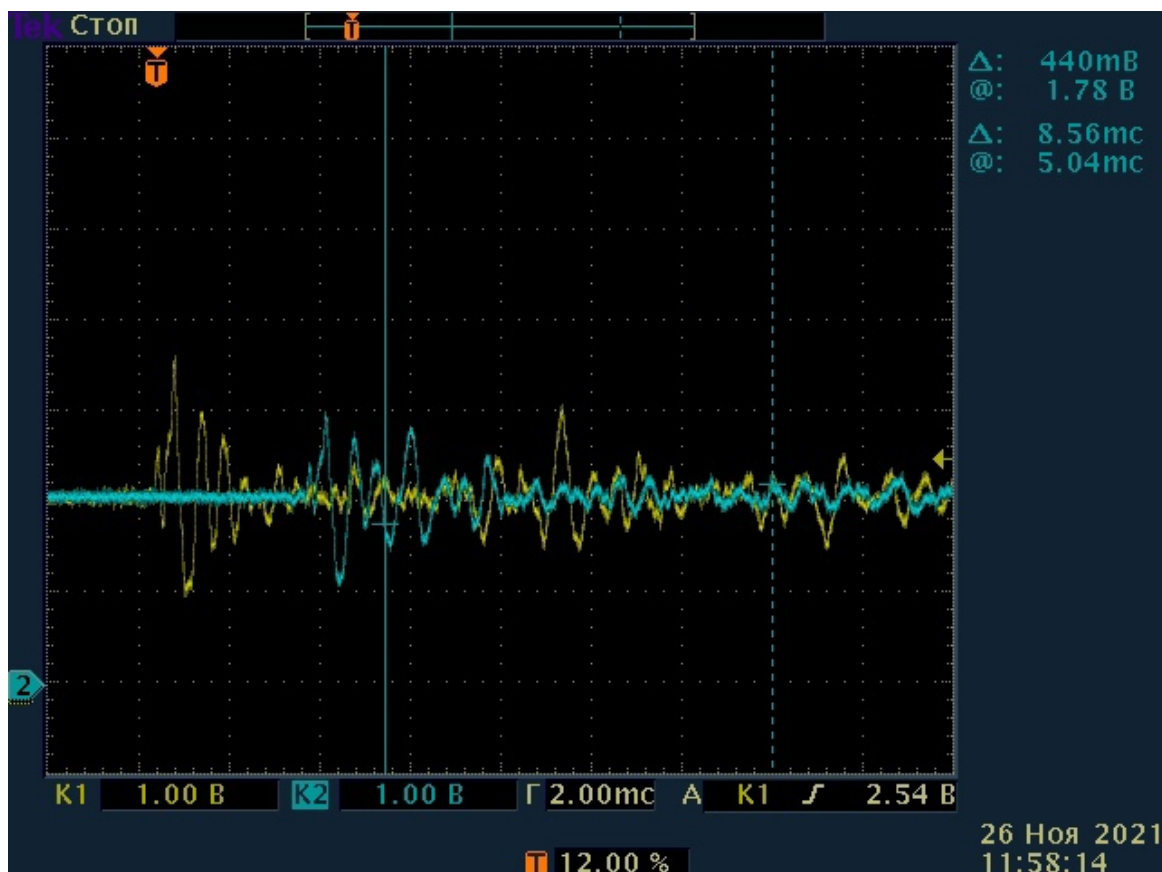


Рис. 5: Изображение сигнала, снятого осциллографом

В результате проведенных измерений были зафиксированы следующие данные:

$$c_{\text{воздух комнатный}} = c_1 \approx 346.7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$c_{\text{воздух с увеличенной концентрацией } CO_2} = c_2 \approx 340.5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

2.2 Аналитическая зависимость

В рамках данного эксперимента считаем, что состав газовой смеси при проведении измерений будет постоянным.

Скорость воздуха $c_L = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}} = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}} = \sqrt{RT \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i C_{P,i} x_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i x_i \sum_{i=1}^n \mu_i C_{V,i} x_i}}$, где n будем считать равным 5 (азот, кислород, аргон, углекислый газ, водные пары). Так как концентрации азота, кислорода

и аргона можно считать стабильными, можно использовать значения μ и γ , подсчитанные для смеси этих трех газов.

Несмотря на то, что во время проведения эксперимента объемная доля водяных паров будет изменяться - например, при изменении состава смеси при помощи воздуха легких объемная доля будет возрастать, в рамках данного эксперимента будем считать ее постоянной. В таком случае можно определить зависимость скорости звука от объемной доли воздуха и зависимость объемной доли воздуха от скорости звука. Температуру тоже можно считать постоянной.

Пусть $i = 1$ - углекислый газ.

$$c_L = \sqrt{RT \frac{\mu_1 C_{P,1} x_1 + (\mu_2 C_{P,2} x_2 + \mu_3 C_{P,3} x_3)}{(\mu_1 C_{V,1} x_1 + (\mu_2 C_{V,2} x_2 + \mu_3 C_{V,3} x_3)) * (\mu_1 x_1 + (\mu_2 x_2 + \mu_3 x_3))}}$$

$$c_L^2 * (\mu_1 C_{V,1} x_1 + (\mu_2 C_{V,2} x_2 + \mu_3 C_{V,3} x_3)) * (\mu_1 x_1 + (\mu_2 x_2 + \mu_3 x_3)) - RT \mu_1 C_{P,1} x_1 = RT(\mu_2 C_{P,2} x_2 + \mu_3 C_{P,3} x_3)$$

$$c_L^2 * (\mu_1 x_1 * (\mu_1 C_{V,1} x_1 + (\mu_2 C_{V,2} x_2 + \mu_3 C_{V,3} x_3)) + (\mu_2 x_2 + \mu_3 x_3) * (\mu_1 C_{V,1} x_1 + (\mu_2 C_{V,2} x_2 + \mu_3 C_{V,3} x_3)) - RT \mu_1 C_{P,1} x_1 = RT(\mu_2 C_{P,2} x_2 + \mu_3 C_{P,3} x_3)$$

$$c_L^2 * (\mu_1 x_1 * (\mu_1 C_{V,1} x_1 + (\mu_2 C_{V,2} x_2 + \mu_3 C_{V,3} x_3)) + (\mu_2 x_2 + \mu_3 x_3) * (\mu_1 C_{V,1} x_1)) - RT \mu_1 C_{P,1} x_1 = RT(\mu_2 C_{P,2} x_2 + \mu_3 C_{P,3} x_3) - c_L^2 * (\mu_2 C_{V,2} x_2 + \mu_3 C_{V,3} x_3) * (\mu_2 x_2 + \mu_3 x_3)$$

$$\implies$$

$$x_1^2 * (c_L^2 * \mu_1^2 C_{V,1}) + x_1 * (-RT \mu_1 C_{P,1} + c_L^2 * (\mu_1 * (\mu_2 C_{V,2} x_2 + \mu_3 C_{V,3} x_3) + \mu_1 C_{V,1} * (\mu_2 x_2 + \mu_3 x_3))) = (RT \mu_2 C_{P,2} x_2 + RT \mu_3 C_{P,3} x_3) - c_L^2 * (\mu_2 C_{V,2} x_2 + \mu_3 C_{V,3} x_3) * (\mu_2 x_2 + \mu_3 x_3)$$

$$x_1 = \frac{-(-RT \mu_1 C_{P,1} + c_L^2 * (\mu_1 * (\mu_2 C_{V,2} x_2 + \mu_3 C_{V,3} x_3) + \mu_1 C_{V,1} * (\mu_2 x_2 + \mu_3 x_3)))}{2 * c_L^2 * \mu_1^2 C_{V,1}} \pm \frac{\sqrt{(-RT \mu_1 C_{P,1} + c_L^2 * (\mu_1 * (\mu_2 C_{V,2} x_2 + \mu_3 C_{V,3} x_3) + \mu_1 C_{V,1} * (\mu_2 x_2 + \mu_3 x_3)))^2 - 4 * (c_L^2 * \mu_1^2 C_{V,1}) * (c_L^2 * (\mu_2 C_{V,2} x_2 + \mu_3 C_{V,3} x_3) * (\mu_2 x_2 + \mu_3 x_3) - RT \mu_2 C_{P,2} x_2 - RT \mu_3 C_{P,3} x_3)}}{2 * c_L^2 * \mu_1^2 C_{V,1}}$$

где 2 относится к смеси кислорода, азота и аргона, 3 относится к водяному пару.

Решение данного уравнения можно использовать для подсчета объемной доли углекислого газа при условии известных значений для данных условий C_P , C_V , μ для водяного пара и смеси кислорода, азота и аргона, и измеренной скорости звука в данной смеси при данных условиях.

Можно использовать другой подход: будем считать, что доля углекислого газа x_1 , остальное все - смесь с известными значениями C_P , C_V , μ , $1 - x_1$. Подставив это в уравнение для скорости звука, можно вывести следующее уравнение для x_1 :

$$c_L^2 (x_1^2 * (\mu_1^2 C_{V,1} - \mu_1 \mu_2 (C_{V,1} + C_{V,2}) - \mu_2 C_{V,2} (\mu_1 - \mu_2)) + x_1 * (\mu_1 \mu_2 (C_{V,1} + C_{V,2}) + \mu_2 C_{V,2} (\mu_1 - \mu_2) - \mu_2^2 C_{V,2}) + \mu_2^2 C_{V,2}) = RT \mu_1 C_{P,1} - RT \mu_2 C_{P,2} x_1 + RT \mu_2 C_{P,2}$$

$$x_1^2 * c_L^2 * (\mu_1^2 C_{V,1} - \mu_1 \mu_2 (C_{V,1} + C_{V,2}) - \mu_2 C_{V,2} (\mu_1 - \mu_2)) + x_1 * (c_L^2 * (\mu_1 \mu_2 (C_{V,1} + C_{V,2}) + \mu_2 C_{V,2} (\mu_1 - \mu_2) - \mu_2^2 C_{V,2}) + RT \mu_2 C_{P,2}) + c_L^2 \mu_2^2 C_{V,2} - RT \mu_1 C_{P,1} - RT \mu_2 C_{P,2}$$

$$a = c_L^2 * (\mu_1^2 C_{V,1} - \mu_1 \mu_2 (C_{V,1} + C_{V,2}) - \mu_2 C_{V,2} (\mu_1 - \mu_2))$$

$$b = c_L^2 * (\mu_1 \mu_2 (C_{V,1} + C_{V,2}) + \mu_2 C_{V,2} (\mu_1 - \mu_2) - \mu_2^2 C_{V,2}) + RT \mu_2 C_{P,2}$$

$$c = c_L^2 \mu_2^2 C_{V,2} - RT \mu_1 C_{P,1} - RT \mu_2 C_{P,2}$$

Как коэффициенты квадратного уравнения.

Так же можно построить зависимость скорости звука от концентрации углекислого газа от массивов значений доли углекислого газа с нужной точностью и найти объемную долю по ближайшим значениям x , дающим необходимую скорость звука.

3 Обработка данных

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import math

t=int(input("input temperature in degrees Ceslsius "))

T=t+273.15

mh20=18.01

fi=float(input("input humidity in % "))

Pa=101325

Pa=Pa+133.322*t

#calculating Ph2o

Ps=6.1121*math.exp((18.678-T/234.5)*T/(257.14+T))

Ph2o=Ps*fi/100

R=8.314

xh2o=Ph2o/R/T

print(xh2o)

def ss(t,xh2o,x,Ph2o):

    #table data

    m1=28.97 # gramm
    mh20=18.01
    mco2=44.01

    Cp1=1.0036
    Cph2o=1.863
    Cpco2=0.838

    Cv1=0.7166
    Cvh2o=1.403
    Cvco2=0.649

    Pa=101325

    R=8.314

    T=t+273.15

    Pa=Pa+133.322*t
```

```

x1=(Pa-Ph2o)/R/T

x1=x1/(x1+xh2o)-x

xh2o=1-x1-x

#calculating total mu

mu=(x1*m1+xh2o*mh2o+x*mco2)*0.001

# calculating gamma

gamma=(Cp1*x1*m1+Cph2o*xh2o*mh2o+Cpco2*mco2*x)/(Cv1*x1*m1+Cvh2o*xh2o*mh2o+Cvco2*x*mco2)

#calculating speed of sound

a=math.sqrt(gamma*R*T/mu)

return(a)

def speedOfSound(t, xh2o, co2Max,dot,Ph2o):

    co2X = []

    soundSpeed = []

    dot=int(dot)

    for i in range(0,dot+1):

        co2X.append(co2Max*i/dot)

        soundSpeed.append(ss(t,xh2o,co2Max*i/dot,Ph2o))

    measure_str=[str(item) for item in soundSpeed]

    with open("da.txt","w") as outfile:

        outfile.write("\n".join(measure_str))

    return soundSpeed

co2Max=float(input("input max concentration of co2, between 0 and 1"))

dot=int(input("number of points "))-1

co2X = []

for i in range(0,dot+1):

    co2X.append(co2Max*i*100/dot)

fig, ax = plt.subplots(figsize=(10,10), dpi=100)

ax.plot(co2X, speedOfSound(t,xh2o,co2Max,dot,Ph2o),label='anal depend')

```

```

k=(speedOfSound(t,xh2o,0.2,3,Ph2o)[0]-speedOfSound(t,xh2o,0.2,3,Ph2o)[3])/20

print('slope of line',k)

b=speedOfSound(t,xh2o,0.2,3,Ph2o)[0]

a=1158/float(input("input time for regular air(ms) "))

b2=(b-a)/k

s1='values in air '+str(int(a*10)/10)+' ms, '+str(int(b2*10)/10)+'%'

ax.plot(b2,a,"c", linewidth = '1.0', marker = '>', markevery=50, markersize =
    '12.0',label=s1)

a1=1158/float(input("input time for lungs air (ms) "))
b1=(b-a1)/k

s2='values in lung air '+str(int(a1*10)/10)+' ms '+str(int(b1*10)/10)+'%'
ax.plot(b1,a1,"g", linewidth = '1.0', marker = '<', markevery=50, markersize =
    '12.0',label=s2)
plt.minorticks_on()
plt.title("speed of sound dependency on CO2 concentration(%)", fontstyle = 'italic',
    horizontalalignment = 'center')
plt.xlabel('CO2 concentration $CO_2$, %')
plt.ylabel("Speed of sound, m/s")
ax.legend()
plt.grid(which='major', color='black', linestyle='-', linewidth = 0.5)
plt.grid(which='minor', color = 'gray', linestyle='--', linewidth = 0.25)
plt.show()
fig.savefig('soundspeed.png')

```

```

input temperature in degrees Celsius } 23
input humidity in % 31
8.599989445059782
input max concentration of co2, between 0 and 1 0.5
number of points 1000
slope of line 1.0838716832503565
input time for regular air(ms) 3.34
input time for lungs air (ms) 3.4

```

Рис. 6: Ввод и вывод в терминале программы

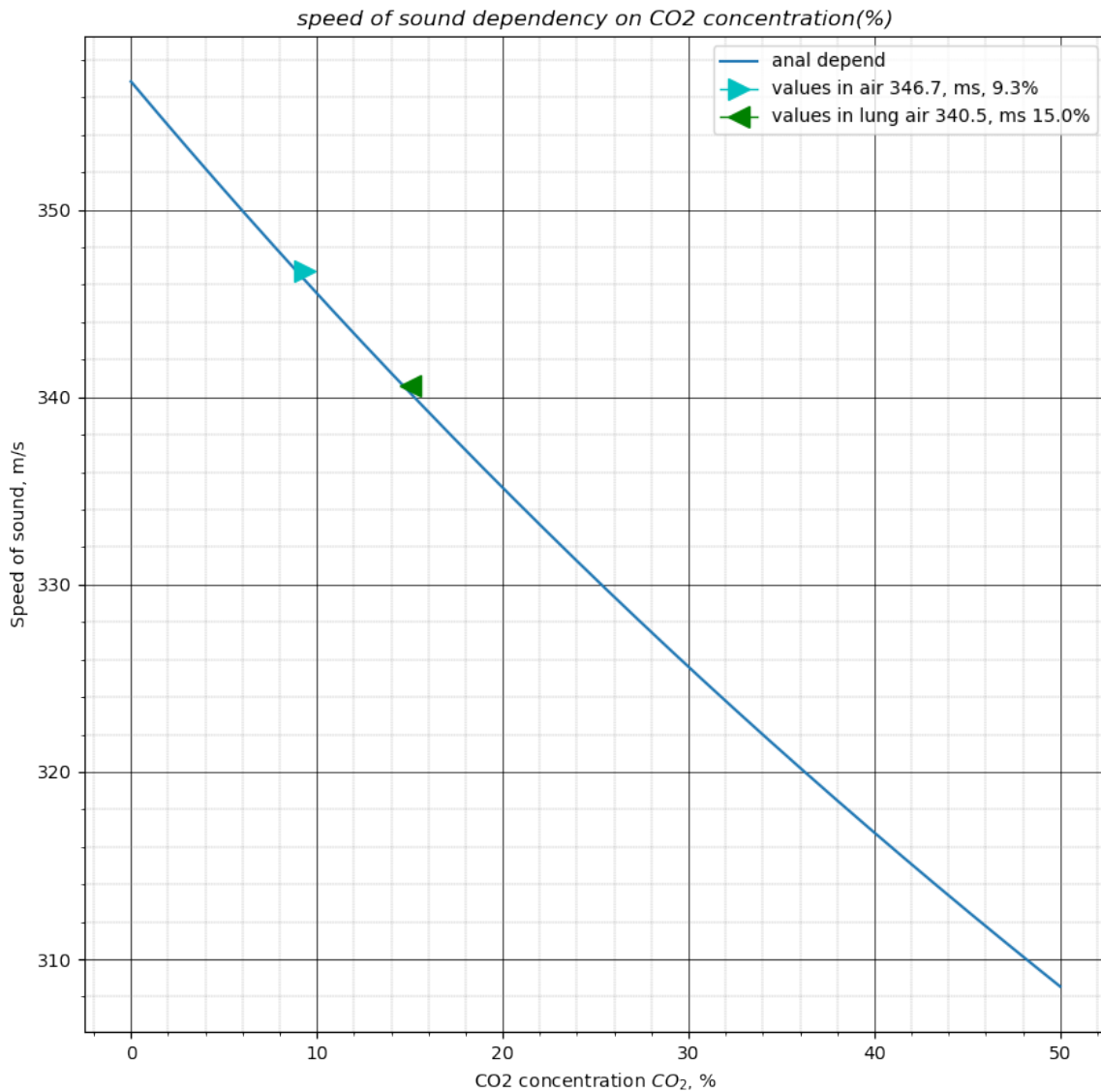


Рис. 7: График зависимости скорости звука от концентрации углекислого газа

Сначала была вычислена молярная масса, затем показатель адиабаты и затем скорость звука, эти шаги были выполнены для значений скорости звука между 0 и 0.5.

Таким образом, было получено, что концентрация углекислого газа в воздухе комнатном - 9.3 %, в воздухе с измененным составом - 15.0 %.

4 Выводы

1. В ходе работы была установлена аппроксимация аналитической зависимости концентрации CO_2 от скорости звука, был найден способ подсчета концентрации CO_2 при условии известной скорости звука в данной смеси воздуха.

2. Были подсчитаны скорости звука для 2 смесей - комнатного воздуха и комнатного воздуха с нагнанным CO_2 , через использование 2 микрофонов, установленных в герметичной трубе, с известным расстоянием между ними и с использованием осциллографа для фиксации сигнала микрофонов при создании возмущения.
3. Возможные источники погрешностей - табличные данные были взяты для $20^\circ C$, не было учтено изменение концентрации водяных паров, погрешность измерений термогигрометра.
4. Исходя из полученных графиков можно сделать предположение, что полученные в результате эксперимента данные сопоставимы с теорией.