

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ C_p/C_v ГАЗОВ ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА

Ц е л ь р а б о т ы : определение отношения теплоемкостей C_p/C_v для различных газов посредством измерения скорости звука методом сложения взаимно-перпендикулярных колебаний.

Л и т е р а т у р а : [4] гл. 6 §§ 6.5, 6.6; [11] гл. II §§ 21, 23; [10] гл. 10 § 85; [19] гл. 1 § 1.4.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и : звуковой генератор, электронный осциллограф, усилитель У2-6, стеклянная трубка с вмонтированными микрофоном и телефоном, насос, манометр, камера с газообразным гелием.

ВВЕДЕНИЕ

В лабораторной работе № 5.6 описан метод определения C_p/C_v газа, основанный на адиабатическом расширении (метод Клемана и Дезорма). Однако, только при идеальной теплоизоляции расширение газа будет адиабатическим. На практике не так просто исключить приток тепла. Легче всего этого достигнуть при очень быстро протекающих процессах. Такие процессы происходят в звуковых волнах, скорость распространения которых зависит от величины постоянной адиабаты $\gamma = C_p/C_v$. На этом основан второй, более точный метод экспериментального определения отношения теплоемкостей для газов.

В газах и жидкостях, обладающих только объемной упругостью, но не упругостью формы, могут распространяться только продольные возмущения. Скорость распространения продольных волн в жидкостях и газах определяется соотношением (см. [10] §85):

$$v = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}} . \quad (1)$$

где P - давление, ρ - плотность.

Звуковая волна в газе представляет собой процессы последовательного сжатия и разрежения среды, причем эти процессы происходят очень быстро, а теплопроводность газа невелика. Следовательно, процесс распространения звука в газе следует считать адиабатическим. Согласно уравнению Пуассона, при адиабатическом процессе в идеальном газе $PV^\gamma = const$. Если вместо объема V в это уравнение ввести плотность $\rho \sim 1/V$, то оно перейдет в $P\rho^{-\gamma} = const$. Продифференцировав, получаем:

$$\rho^{-\gamma} dP - \gamma P \rho^{-\gamma-1} d\rho = 0, \text{ или } \rho \cdot dP - \gamma P \cdot d\rho = 0,$$

откуда находим для адиабатического процесса:

$$\frac{dP}{d\rho} = \gamma \frac{P}{\rho}.$$

Из уравнения Менделеева–Клапейрона следует, что

$$P = \frac{\rho}{\mu} RT, \quad (2)$$

поэтому скорость звука

$$v_{зв} = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}} \quad (3)$$

(R - молярная газовая постоянная, μ - молярная масса, T - абсолютная температура). Формула (3) получила название формулы Лапласа.

Впервые формулу (1) для вычисления скорости звука применил Ньютон. Но при вычислении производной $dP/d\rho$ он исходил из того, что сжатия и разрежения в звуковой волне происходят при постоянной температуре. Из (1), (2) при $T = const$ следует: $v = \sqrt{\frac{RT}{\mu}}$.

Согласно этой формуле, скорость звука в воздухе при нормальных условиях $v = 280$ м/с, что существенно расходится с экспериментом. Причина этого расхождения как раз и была устранена Лапласом, показавшим, что распространение звука есть адиабатический процесс.

В данной работе для измерения скорости звука в газе используется метод, аналогичный описанному в лабораторной работе 1.14. Телефон, излучающий звуковые волны, питается от звукового генератора. Микрофон, помещенный на расстоянии L от телефона, улавливает эти волны. Переменное напряжение

с выхода звукового генератора подается на вход “X” осциллографа, а переменное напряжение с выхода микрофона – на вход “Y”. Таким образом, на экране электронно-лучевой трубки будет наблюдаться результат сложения двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаний одинаковой частоты – эллипс, причем разность фаз между колебаниями

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} L,$$

где λ – длина звуковой волны. При плавном изменении частоты колебаний f траектория луча на экране также меняется. При разности фаз $\Delta\phi = 2\pi n$ ($n = 1, 2, \dots$) эллипс вырождается в прямую, проходящую через первый и третий квадранты. Легко показать, что прямые на экране осциллографа будут наблюдаться при условии:

$$f = n \frac{v_{зв}}{L},$$

где n – целое число. Всякий раз, когда при изменении частоты колебаний прямая трансформируется в эллипс, а затем снова в прямую линию,

происходит изменение n на единицу. Следовательно, $f_n - f_k = (n - k) \frac{v_{зв}}{L}$, где

f_n и f_k – частоты, соответствующие целым числам n и k . Из полученного соотношения легко можно выразить скорость звука:

$$v_{зв} = L \frac{f_n - f_k}{n - k}. \quad (4)$$

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ



Справа вы видите фотографию экспериментальной установки. Ее схема изображена на рис. 5.7.1.

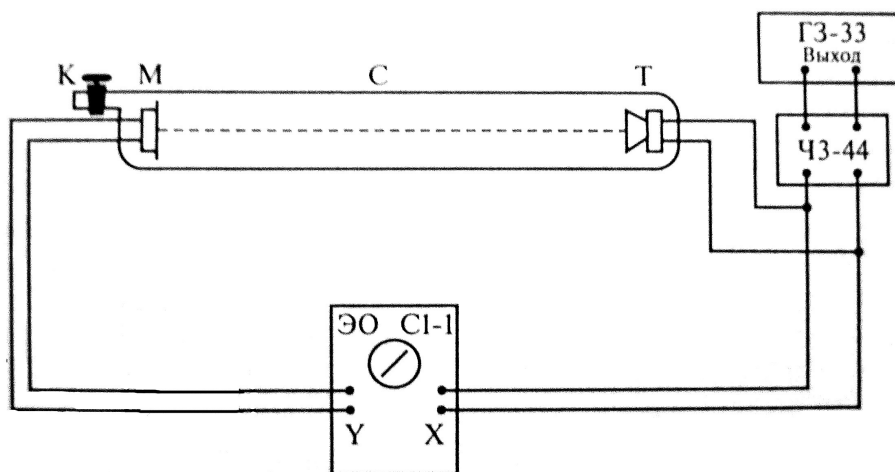


Рис. 5.7.1

Внутри запаянной трубки С с воздухом (она подвешена вертикально на стене) укреплены: источник звука – телефонный капсюль Т (телефон), подключенный к выходу звукового генератора ЗГ, и микрофон М. Частота звукового генератора измеряется с помощью частотомера ЧЗ-44. Сигнал с микрофона подается на “У”-пластины ЭО. На “Х”-пластины электронного осциллографа ЭО С1-1 сигнал поступает непосредственно от звукового генератора.

На выходе стеклянной трубки С имеется кран К, предназначенный для присоединения трубки к насосу или к баллону с гелием. При откачке давление в трубке контролируется манометром.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Задание 1. Определение скорости звука в воздухе.

Перед началом работы откачайте содержимое трубки, включив насос на 1 минуту, и заполните ее воздухом, открыв кран К.

а) Плавно увеличивая частоту генератора, начиная с 1000 Гц (это ограничение накладывают амплитудно-частотные характеристики микрофона и телефона), получите ряд последовательных значений частоты,

при которых на экране С1-1 наблюдаются прямые линии в одинаковом квадранте. Убедитесь в повторяемости результатов, произведя измерения при уменьшении частоты.

б) Полученные результаты изобразите на графике, откладывая по оси абсцисс порядковый номер измерения, а по оси ординат – частоту. По графику с помощью формулы (4) определите среднее значение скорости звука и оцените погрешность.

в) Вычислите постоянную адиабаты γ и оцените погрешность ее определения. Сравните полученное значение с теоретическим.

Задание 2. Включите насос и, контролируя давление в трубке по манометру, откачайте воздух до давления 0,4–0,5 атм. Измерьте скорость звука при этом давлении. Сделайте вывод о зависимости v от давления.

Задание 3. Определение скорости звука в гелии.

Полностью откачайте воздух из трубки и наполните ее гелием из камеры. Измерьте скорость звука в гелии. Вычислите γ . Оцените погрешность результатов, сравните полученные значения v и γ с теоретическими.

Задание 4. Определение скорости звука в смеси газов.

Откачайте гелий до давления 0,6–0,7 атм. Отключив насос, дополните содержимое трубки воздухом, на короткое время открыв кран К. Измерьте скорость звука в смеси воздух–гелий. По значению скорости вычислите отношение парциальных давлений гелия и воздуха.

Сравните результат с показаниями манометра.

ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Рассчитайте скорость звука в сухом воздухе при температуре 0°C. Зависит ли скорость звука от давления?
2. Рассчитайте скорость звука в смеси газов, состоящей из двух молей воздуха и одного моля углекислого газа при температуре 0°C.
3. Получите уравнение Пуассона для адиабатического процесса.

4. Какой газ охладится сильнее при адиабатическом расширении от давления P_1 до давления P_2 : гелий или воздух?