

РАБОТА 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА ПО СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ

Цель работы: определение отношения теплоемкостей воздуха по скорости звука в воздухе.

Введение

Теплоемкостью тела называется физическая величина, равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить телу, чтобы увеличить его температуру на один кельвин

$$C = \frac{\delta Q}{dT}. \quad (10.1)$$

Теплоемкость единицы массы вещества называется удельной теплоемкостью

$$c = \frac{1}{m} \frac{\delta Q}{dT}, \quad (10.2)$$

где m – масса вещества. Теплоемкость одного моля вещества называется молярной теплоемкостью и обозначается как

$$C_M = \frac{M}{m} \frac{\delta Q}{dT} = \frac{1}{\nu} \frac{\delta Q}{dT}, \quad (10.3)$$

где ν – число молей вещества, M – молярная масса вещества.

Величина теплоемкости зависит от условий, при которых происходит нагревание тела. Наибольший интерес представляет теплоемкость при постоянном объеме C_V или при постоянном давлении C_p , когда нагревание происходит при постоянном объеме или при постоянном давлении.

Согласно первому началу термодинамики, тепло δQ , подводимое к системе, расходуется на увеличение внутренней энергии системы dU и на совершение работы против внешних сил δA

$$\delta Q = dU + \delta A. \quad (10.4)$$

Если в результате процесса работа не совершается, т.е. $V = const$, то теплоемкость определяется внутренней энергией и согласно выражению (10.1) определяется как

$$C_V = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_V = \frac{dU}{dT}. \quad (10.5)$$

Внутренняя энергия одного моля идеального газа равна произведению числа Авогадро на среднюю энергию одной молекулы:

$$U_M = N_A \varepsilon = \frac{i}{2} N_A kT = \frac{i}{2} RT, \quad (10.6)$$

где i – число степеней свободы молекулы; k – постоянная Больцмана; N_A – число Авогадро, $R = kN_A$ – универсальная газовая постоянная.

Внутренняя энергия произвольной массы газа m будет равна внутренней энергии одного моля, умноженной на число молей газа, содержащихся в массе m :

$$U = \frac{m}{M} U_M = \frac{m}{M} \frac{i}{2} RT. \quad (10.7)$$

Из выражения (10.5) видно, что для того, чтобы получить теплоемкость моля идеального газа при постоянном объеме, нужно продифференцировать по температуре выражение (10.6) для внутренней энергии газа. Произведя дифференцирование, получим молярную теплоемкость газа при постоянном объеме:

$$C_V = \frac{i}{2} R. \quad (10.8)$$

Как следует из этого выражения, молярная теплоемкость идеального при постоянном объеме величина постоянная, не зависящая от параметров состояния, в частности от температуры.

При постоянном давлении, теплоемкость моля идеального газа можно записать в виде:

$$C_p = \left(\frac{\delta Q_M}{dT} \right)_p = \frac{dU_M}{dT} + p \left(\frac{dV_M}{dT} \right)_p = C_V + p \left(\frac{dV_M}{dT} \right)_p. \quad (10.9)$$

Величина $\left(\frac{dV_M}{dT} \right)_p$ представляет собой приращение объема моля при повышении температуры на один градус, получающееся в случае, если давление постоянно.

В соответствии с уравнением состояния ($pV = \frac{m}{M} RT$), объем одного моля $V_M = \frac{RT}{p}$.

Дифференцируя это выражением по температуре, получаем:

$$\left(\frac{dV_M}{dT} \right)_p = \frac{R}{p}.$$

Подставляя этот результат в (10.9) находим:

$$C_p = C_V + R. \quad (10.10)$$

Теплоемкость C_p всегда больше теплоемкости C_V ($C_p > C_V$).

С учетом формулы (10.8) можно получить для C_p следующие выражение:

$$C_p = \frac{i}{2}R + R = \frac{i+2}{2}R . \quad (10.11)$$

Поделив (10.11) на (10.8), можно найти характерное для каждого газа отношение теплоемкостей:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i} . \quad (10.12)$$

Как следует из (10.12), величина γ определяется числом и характером степеней свободы i . При жесткой связи молекул, учитываются только поступательные и вращательные степени свободы. Число степеней свободы определяется числом атомов в молекуле. Для одноатомного газа $i = 3$ (поступательные степени свободы); для двухатомного газа $i = 5$ (три поступательные и две вращательные степени свободы); для трех и более атомов в молекуле $i = 6$ (три поступательные и три вращательные степени свободы).

Звуковые волны в газах и жидкостях являются продольными. В твердых телах могут распространяться как продольные, так и поперечные звуковые волны. Скорость их распространения (скорость звука) зависит от упругих свойств среды и плотности, и определяется формулой:

$$V_{np} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} , \quad (10.13)$$

где ρ – плотность среды; E – модуль продольной упругости.

Процесс распространения звуковых волн в газах схематически можно представить следующим образом: источник механических колебаний передает эти колебания окружающим его газовым молекулам: в результате изменяется давление газа в данной микрообласти пространства. Так как газ обладает упругими свойствами, то он немедленно расширяется, и в данном элементарном объеме газа образуется разрежение, а микрообласть повышенного давления перемещается несколько дальше от источника звука и т. д. Процессы сжатия и разрежения протекают очень быстро, поэтому изменение давления газа происходит без теплообмена.

Так как для газов модуль продольной упругости связан с давлением соотношением:

$$E = \gamma p , \quad (10.14)$$

то для скорости звука в газе можно записать:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} . \quad (10.15)$$

Выразив из уравнения Клапейрона – Менделеева

$$pV = \frac{m}{M}RT$$

плотность газа ($\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT}$) и подставив в (10.15), получаем:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}, \quad (10.16)$$

откуда

$$\gamma = \frac{v^2 M}{RT}. \quad (10.17)$$

В данной работе определяется отношение теплоемкостей воздуха, измеряя температуру газа и определяя скорость звука в газе. Поскольку воздух состоит в основном из смеси двухатомных газов (водорода, кислорода, азота) и каждой молекуле приписывают пять степеней свободы, то отношение теплоемкостей для воздуха будет равно $\gamma = 1,4$. Это довольно хорошо согласуется по порядку величины с экспериментальными данными, полученными для чистого воздуха, свободного от CO_2 и паров воды при нормальных условиях.

Методика выполнения работы

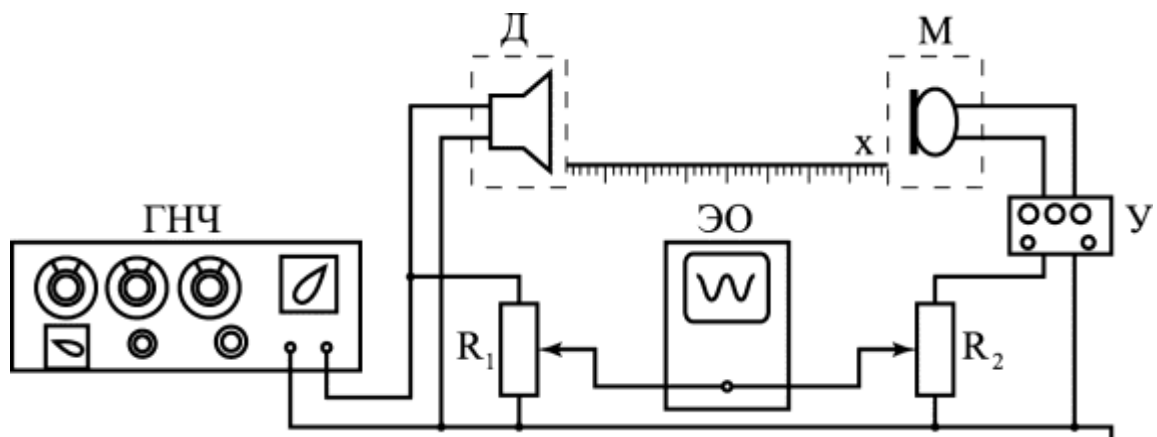


Рис.10.1

Работа выполняется на установке, схема которой показана на рис. 10.1. Источником звуковых колебаний является динамик Д, на который подается электрический синусоидальный сигнал от генератора ГНЧ. Приемником звуковых сигналов является микрофон М, устанавливаемый на некотором расстоянии x от динамика. Микрофон преобразует звуковые колебания в электрические с той же частотой ω . Электрические сигналы от генератора и микрофона подаются одновременно на осциллограф ЭО, который регистрирует суммарный сигнал от двух источников: генератора и микрофона. Пусть ток, создаваемый генератором,

$$I_1 = I_{10} \cos(\omega t + \varphi_1),$$

а ток, создаваемый микрофоном,

$$I_2 = I_{20} \cos(\omega t + \varphi_2),$$

тогда суммарный регистрируемый ток

$$I = I_0 \cos(\omega t + \varphi),$$

где

$$I_0 = \sqrt{I_{10}^2 + I_{20}^2 + 2I_{10}I_{20} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}, \quad (10.18)$$

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi$ – начальные фазы токов I_1, I_2 и результирующего тока I . При изменении разности фаз $\varphi_2 - \varphi_1$ в диапазоне от 0 до π , амплитуда результирующего тока изменяется в пределах от максимума $(I_{10} + I_{20})$ до минимума $|I_{10} - I_{20}|$.

Разность фаз сигналов от генератора и микрофона в работе можно менять, перемещая микрофон. При этом наблюдаются минимумы и максимумы результирующего сигнала на экране осциллографа.

Уравнение колебаний частицы упругой среды, находящейся на расстоянии x от источника колебаний, имеет вид:

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx), \quad (10.19)$$

где A – амплитуда колебаний; ω – циклическая частота, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число. λ – длина волны, расстояние между ближайшими друг к другу частицами, имеющими при распространении колебаний одинаковые фазы. Путь, равный λ , волна проходит за время, в течение которого частица среды совершает одно колебание, т.е. за период колебаний T . Поэтому скорость распространения волны

$$v = \lambda/T. \quad (10.20)$$

Разность фаз сигналов изменяется согласно формуле (10.19) в соответствии с изменением расстояния x :

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda}(x_2 - x_1). \quad (10.21)$$

Расстояние между двумя соседними максимумами или минимумами соответствует разности фаз 2π и, таким образом, должно быть равно длине волны λ . Если на отрезке $\Delta x = x_n - x_1$ укладывается n максимумов или минимумов, то длина волны может быть определена по формуле:

$$\lambda = \frac{x_n - x_1}{n - 1}. \quad (10.22)$$

Порядок выполнения работы

Задание 1. Определение длины волны звука в воздухе.

1. Установите частоту звуковых сигналов генератора $\tilde{\nu} = 3,4$ кГц. С помощью осциллографа выровняйте амплитуды сигналов от генератора и микрофона.

2. Передвиньте микрофон к динамику на ближайшее расстояние, при котором наблюдается минимум результирующего сигнала. Измерьте расстояние x между динамиком и микрофоном. Результат запишите в табл. 10.1.

Таблица 10.1

№ минимумов или максимумов	1	2	3	4	5	6
$x_{\text{мин}}, \text{см}$						
$x_{\text{макс}}, \text{см}$						

3. Отодвигая микрофон, найдите следующие минимумы и измерьте соответствующие расстояния x между динамиком и микрофоном. Результаты также запишите в табл. 10.1.

4. Повторите задание пп. 2 и 3 для максимумов. Полностью заполните табл. 10.1.

5. По результатам измерения x , определите длину звуковой волны λ в воздухе по формуле (10.22) для минимумов и максимумов. Рассчитайте среднее значение и погрешность λ для минимумов и максимумов. Результаты запишите в табл. 10.2.

Таблица 10.2

$\langle \lambda_{\text{макс}} \rangle, \text{см}$	$\langle \lambda_{\text{мин}} \rangle, \text{см}$	$\langle v_{\text{макс}} \rangle, \text{м/с}$	$\langle v_{\text{мин}} \rangle, \text{м/с}$	$\gamma_{\text{макс}}$	$\gamma_{\text{мин}}$

$T = \dots \text{C}^0$

Задание 2. Определение отношения теплоемкостей воздуха

1. По результатам определения λ и частоты сигнала $\tilde{\nu} = 3,4$ кГц рассчитайте скорость звука в воздухе по формуле (10.20) для минимумов и максимумов. Определите погрешности. Результаты вычислений запишите в табл. 10.2.

2. Измерьте комнатную температуру T .

3. По формуле (10.17) вычислите γ для минимумов и максимумов. Рассчитайте погрешности γ .

4. Напишите заключение к работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое удельная и молярная теплоемкость вещества? От чего они зависят?
2. Как связаны удельная и молярная теплоемкости между собой?
3. Как называются величины, обозначаемые как C_p и C_v ?
4. Почему γ всегда больше единицы?
5. Каково ожидаемое значение γ для воздуха, если считать, что воздух представляет собой смесь двухатомных газов?
6. К какому типу волн относятся звуковые волны?
7. Какие волны называются продольными, какие – поперечные?