

5579

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В.Ф. УТКИНА**

ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ

Методические указания
к лабораторной работе

Рязань 2020

УДК 537.0(075)

Измерение отношения удельных теплоемкостей: методические указания к лабораторной работе / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост. Д.В. Кирюшин; под ред. М.В. Дубкова. Рязань, 2020. 8 с.

Содержат основные теоретические положения, описание методики измерения скорости звука и определения отношения удельных теплоемкостей, дан порядок выполнения работы.

Предназначены для студентов всех специальностей, изучающих дисциплину «Физика».

Ил. 3. Библиогр.: 2 назв.

Термодинамика, работа, количество теплоты, адиабатический процесс, резонанс, скорость звука, удельная теплоемкость, показатель адиабаты

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина.

Рецензент: кафедра общей и экспериментальной физики РГРТУ (зав. кафедрой проф. М.В. Дубков)

Измерение отношения удельных теплоемкостей

Составитель К и р ю ш и н Дмитрий Вячеславович

Редактор Р.К. Мангутова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 15.06.20. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,5.

Тираж 200 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: изучение теоретических основ и экспериментального метода измерения отношения удельных теплоемкостей воздуха.

Приборы и принадлежности: звуковой генератор, электронный осциллограф, микрофон, телефон, частотомер, труба с воздухом.

Элементы теории и метод эксперимента

Термодинамикой называется раздел физики, в котором изучаются физические процессы с точки зрения происходящих в них превращений энергии с учетом двух форм ее передачи: работы и теплообмена. Термодинамика совсем не рассматривает самого механизма явлений и ограничивается лишь энергетическими соображениями, основанными на двух законах, получивших название «начал».

Первый закон (первое начало) термодинамики – изменение внутренней энергии ΔU_{1-2} замкнутой системы, которое происходит в процессе $1 \rightarrow 2$ перехода системы из состояния 1 в состояние 2, равно сумме работы A'_{1-2} , совершаемой *над системой* внешними силами, и количества теплоты Q_{1-2} , сообщаемого системе:

$$\Delta U_{1-2} = A'_{1-2} + Q_{1-2} , \quad (1)$$

$A'_{1-2} = -A_{1-2}$, A_{1-2} – работа, совершаемая *системой* над внешними телами в процессе $1 \rightarrow 2$, поэтому

$$Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + A_{1-2} . \quad (2)$$

Количество теплоты, сообщаемое системе, расходуется на изменение внутренней энергии системы и на совершение системой работы против внешних сил.

Для элементарного количества теплоты δQ , элементарной работы δA и бесконечно малого изменения dU внутренней энергии первый закон термодинамики имеет вид

$$\delta Q = dU + \delta A . \quad (3)$$

Если $\delta Q > 0$, то к системе подводится теплота. Если $\delta Q < 0$, то от системы отводится теплота. В конечном процессе $1 \rightarrow 2$ элементарные количества теплоты могут быть обоих знаков и общее количество теплоты Q_{1-2} равно алгебраической сумме количества теплоты на всех участках этого процесса:

$$Q_{1-2} = \int_1^2 \delta Q . \quad (4)$$

Если система производит работу над внешними телами, то считается, что $\delta A > 0$, а если над системой совершается работа внешними силами, то $\delta A < 0$. Работа A_{1-2} , совершаемая системой в конечном процессе

1→2, равна алгебраической сумме работ δA , совершаемых системой на всех участках этого процесса:

$$A_{1-2} = \int_1^2 \delta A . \quad (5)$$

Адиабатический процесс происходит при условии $\delta Q = 0$. Существенно, что для определения этого процесса условие $Q=0$ не годится, ибо оно означает не требование отсутствия теплообмена с внешней средой, а лишь равенство нулю алгебраической суммы количества теплоты, подводимой и отводимой от газа на различных участках процесса. При адиабатическом процессе работа совершается идеальным газом за счет убыли его внутренней энергии:

$$\delta A = -dU = -\frac{M}{\mu} C_{v\mu} dT , \quad (6)$$

где $C_{v\mu}$ – молярная теплоемкость газа при постоянном объеме; $\frac{M}{\mu}$ – число молей газа, содержащихся в массе M газа; dT – элементарное изменение температуры газа.

Если газ адиабатически расширяется, то $\delta A = pdV > 0$ и происходит его охлаждение ($dT < 0$). При адиабатическом сжатии газ нагревается:

$$\delta A = pdV < 0 \quad (7)$$

и $dT > 0$.

Для равновесного адиабатического процесса справедливо уравнение Пуассона

$$pV^\gamma = const , \quad (8)$$

где γ – коэффициент Пуассона (показатель адиабаты).

Используя уравнение Менделеева - Клапейрона, можно из уравнения Пуассона найти связь между p и T , а также V и T в адиабатическом процессе:

$$pT^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}} = const , VT^{-\frac{1}{\gamma-1}} = const , \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{C_{p\mu}}{C_{v\mu}} = \frac{C_p}{C_v} > 1 , \quad (10)$$

где $C_{v\mu}$ – молярная и C_v – удельная теплоемкости при постоянном объеме; $C_{p\mu}$ и C_p – молярная и удельная теплоемкости при постоянном давлении.

На рис. 1 сплошная кривая – адиабата – изображает в p - V -диаграмме адиабатический процесс, а штриховая линия – изотерма – изотермический процесс при температуре, соответствующей начальному состоянию 1 газа. При адиабатическом процессе давление меняется с изменением объема газа резче, чем при изотермическом процессе. При адиабатическом расширении уменьшается температура газа и его давление падает быстрее, чем при соответствующем изотермическом расширении. При адиабатическом сжатии газа его давление возрастает быстрее, чем при изотермическом сжатии. Это связано с тем, что увеличение давления происходит за счет уменьшения объема газа и в связи с возрастанием температуры. Работа A_{1-2} , совершаемая газом при адиабатическом процессе $1 \rightarrow 2$, измеряется площадью, заштрихованной на рис. 1.

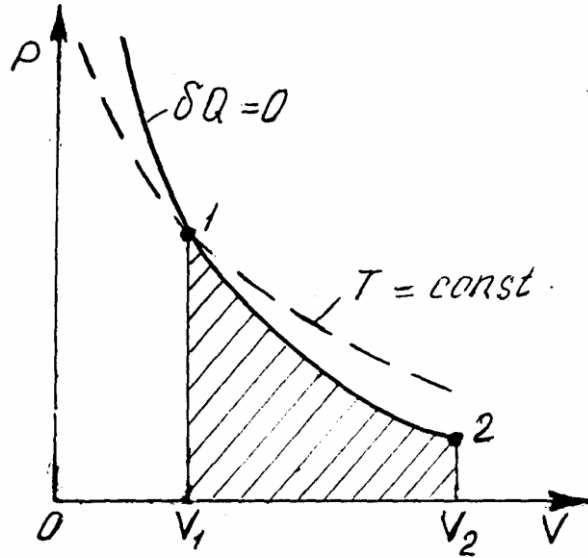


Рис.1

Распространение звуковой волны в газе (воздухе) происходит адиабатически, так как сжатия и разрежения в газе сменяют друг друга настолько быстро, что теплообмен между слоями газа, имеющими разные температуры, не успевает произойти. Такие процессы описываются уравнением (8). Известно, что скорость распространения звуковой волны в газах зависит от показателя адиабаты γ .

Скорость звука в газах определяется формулой

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}}, \quad (11)$$

где R – универсальная газовая постоянная; T – температура газа; μ – молярная масса газа.

Преобразуя формулу (10), находим

$$\gamma = \frac{\mu}{RT} v^2. \quad (12)$$

Таким образом, для определения показателя адиабаты достаточно измерить температуру газа и скорость распространения звука (молярная масса предполагается известной – для воздуха $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль).

Звуковая волна, распространяющаяся вдоль трубы, испытывает многократные отражения от торцов. Звуковые колебания в трубе являются наложением всех звуковых волн и, вообще говоря, очень сложны. Кар-

тина упрощается, если длина трубы L равна целому числу длин полуволн, т.е. когда

$$L = n \frac{\lambda}{2}, \quad (13)$$

где λ – длина волны звука в трубе; n – любое целое число.

Если условие (13) выполнено, то волна, отраженная от торца трубы, вернувшись к ее началу и вновь отраженная, совпадает по фазе с падающей.

При звуковых колебаниях слои воздуха, прилегающие к торцам трубки, не испытывают смещения (узел смещения). Узлы смещения повторяются по всей длине трубы через $\frac{\lambda}{2}$. Между узлами находятся максимумы смещения (пучности).

Скорость звука связана с его частотой ν и длиной волны λ соотношением

$$\upsilon = \lambda \nu. \quad (14)$$

В данной работе измерение скорости звука заключается в следующем. Звуковые колебания в трубе возбуждаются телефоном $T\Phi$ и улавливаются микрофоном M . Мембрана телефона приводится в движение переменным током звуковой частоты; в качестве источника переменной ЭДС используется звуковой генератор $ЗГ$ (рис. 2).

Возникающий в микрофоне сигнал наблюдается на экране электронного осциллографа $ЭО$. Частота звуковых колебаний ν измеряется электронным частотомером $ЧМ$. Фаза регистрируемой звуковой волны зависит от расстояния между телефоном и микрофоном, которое может изменяться произвольно. Измеряя расстояние между положениями микрофона M , в которых фазы колебаний различаются на 2π , находят значение длины волны.

Для определения фазы колебаний на горизонтально отклоняющие пластины X осциллографа подают синусоидальное напряжение $U_x = U_{0x} \sin 2\pi \nu t$ (при этом собственный генератор развертки должен быть отключен). Тогда смещение электронного луча вдоль оси x будет изменяться по закону

$$x = x_0 \sin 2\pi \nu t, \quad (15)$$

где x_0 – амплитудное значение смещения.

Если теперь на вертикально отклоняющие пластины Y подать напряжение той же частоты, что и на горизонтально отклоняющие пластины, но сдвинутое по фазе относительно последнего на величину φ , то смещение луча по оси y будет

$$y = y_0 \sin(2\pi \nu t + \varphi), \quad (16)$$

где y_0 – амплитуда вертикального смещения луча.

В результате сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний на экране будет наблюдаться траектория движения электронного луча в виде эллипса (рис. 3), уравнение которого имеет вид

$$\frac{x^2}{x_0^2} + \frac{y^2}{y_0^2} - 2\frac{xy}{x_0 y_0} \cos \varphi = \sin^2 \varphi. \quad (17)$$

В частном случае, когда разность фаз колебаний равна нулю ($\varphi=0$), эллипс вырождается в прямую, проходящую через квадранты 1 и 3. Если же $\varphi=\pi$, то прямая проходит через квадранты 2 и 4 масштабной сетки экрана осциллографа.

Таким образом, изменением расстояния L_R между телефоном и микрофоном (рис. 2) можно фиксировать положения, при которых фаза изменяется на π или 2π .

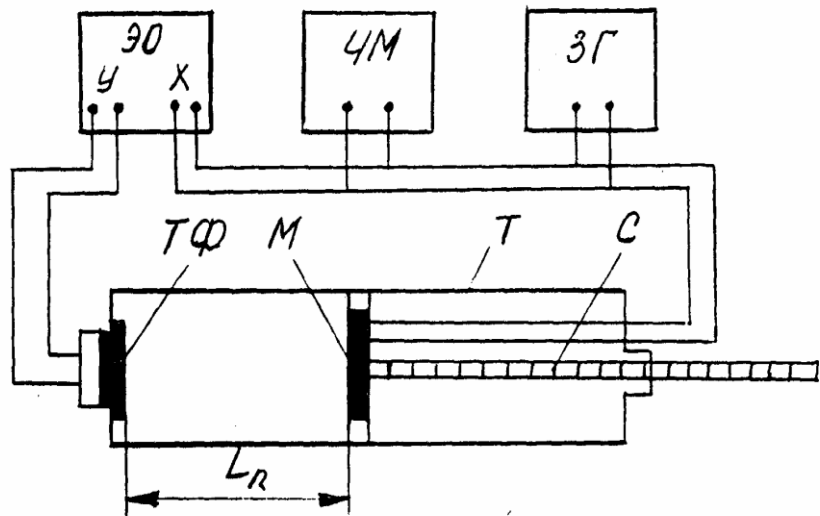


Рис. 2

Длина волны может быть найдена из соотношения

$$L_n = n \frac{\lambda}{2}, \quad (18)$$

где L_n – расстояние между n положениями телефона и микрофона, в которых эллипс последовательно вырождается в прямые A и B (рис. 3). С учетом формулы (14) имеем

$$\nu = \frac{2L_n \nu}{n}. \quad (19)$$

При неизменной частоте ν звукового генератора (и, следовательно, неизменной длине звуковой волны λ) можно изменять расстояние L_n между телефоном и микрофоном. Для этого микрофон или телефон приближаются или удаляются друг от друга с помощью стержня C (рис. 2) с нанесенной шкалой, расстояние между метками которой 0,5 см.

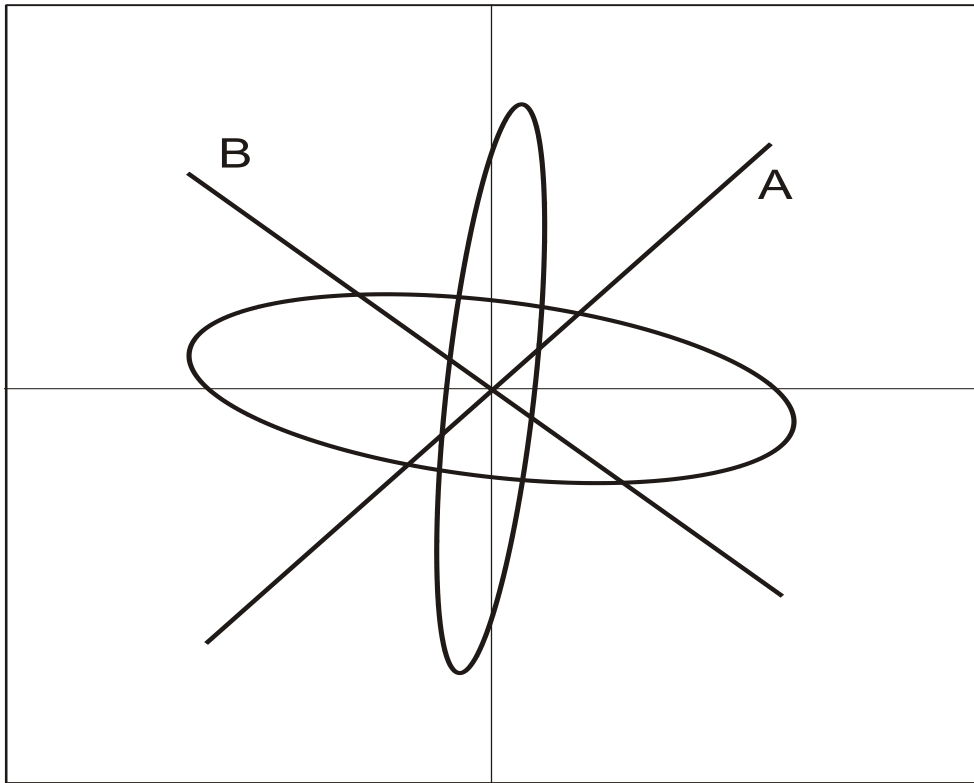


Рис. 3.

Наблюдая положения, в которых эллипс вырождается в прямую, имеем

$$L_n = n \frac{\lambda}{2}, L_{n+1} = (n+1) \frac{\lambda}{2}, \dots, L_{n+k} = n \frac{\lambda}{2} + k \frac{\lambda}{2}, \quad (20)$$

т.е. $\frac{\lambda}{2}$ равно угловому коэффициенту графика зависимости L_n от номера положения n . Скорость звука находится по формуле (14), а отношение удельных теплоемкостей рассчитывается по формуле (12).

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему для измерения скорости звука в воздухе.
2. Включить электронный осциллограф, звуковой генератор и частотомер в электрическую сеть (прогреть приборы в течение 3-4-х минут).
3. Изменяя расстояние L_n (рис. 2) между микрофоном и телефоном при данной частоте ν , получить на экране осциллографа траекторию движения электронного луча в виде эллипса (рис. 3). Примерный диапазон частот указан на установке.
4. Проследить, как форма и размеры эллипса зависят:
 - от частоты и амплитуды напряжения, подаваемого со звукового генератора на телефон;
 - от расстояния L_n между телефоном и микрофоном.
5. Установить микрофон в крайнее левое положение (рис. 2), при этом расстояние между телефоном и микрофоном минимально.

6. Удаляя микрофон от телефона, зафиксировать положение стержня, при котором эллипс вырождается в прямую – это соответствует началу отсчета L_n ($n=0$), затем измерить L_{n+1} , ..., L_{n+x} , при которых эллипс последовательно вырождается в прямую.

7. По полученным результатам измерений построить график зависимости L_n от n , из которого определить $\frac{\lambda}{2}$ и рассчитать скорость звука по формуле (14).

8. Измерения провести для 3-4 значений частоты (диапазон частот указан на установке).

9. Рассчитать показатель адиабаты, используя формулу (12) для различных частот ν звуковых колебаний.

10. Найти среднее значение γ .

11. Оценить погрешность измерения γ и сравнить полученное значение γ с теоретически расчетным, считая молекулу воздуха двухатомной.

Дополнительное задание

Скорость звука может быть определена и другим способом. При постоянном расстоянии L между микрофоном и телефоном можно плавно изменять частоту ν звуковых колебаний, а следовательно, и длину звуковой волны λ . Для последовательных резонансов имеем

$$L = \frac{\lambda_1}{2}n = \frac{\lambda_2}{2}(n+1) = \dots = \frac{\lambda_{k+1}}{2}(n+k). \quad (21)$$

Из (14) и (20) находим:

$$\nu_1 = \frac{\nu}{\lambda_1} = \frac{\nu}{2L}n, \quad \nu_{k+1} = \frac{\nu}{\lambda_{k+1}} = \frac{\nu}{2L}(n+k) = \nu_1 + \frac{\nu}{2L}k. \quad (22)$$

Скорость звука, деленная на $2L$, определяется, таким образом, по угловому коэффициенту графика зависимости частоты от номера резонанса.

Порядок выполнения дополнительного задания

1. Включите звуковой генератор, электронный осциллограф и частотомер.

2. Получите устойчивую картину сигнала звукового генератора (синусоиду) на экране осциллографа (при этом генератор развертки осциллографа должен быть включен). Расстояние между телефоном и микрофоном должно оставаться постоянным.

3. Плавно увеличивая частоту генератора, получите ряд последовательных резонансных значений частоты, отмечая момент резонанса по увеличению амплитуды колебаний на экране осциллографа.

4. Полученные результаты изобразите на графике, откладывая по оси абсцисс номер резонанса k , а по оси ординат – разность между частотой последующих резонансов и частотой первого резонанса $\nu_{k+1} - \nu_1$. Через полученные точки проведите наилучшую прямую. Угловой коэффициент прямой определяет величину $\frac{v}{2L}$ [см. формулу (22)].

5. Вычислите значение скорости звука v и рассчитайте показатель адиабаты, используя формулу (12).

6. Оцените погрешность измерения γ .

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Дайте определение теплоемкости. Что такое молярная, удельная теплоемкость?

2. Какой процесс называется адиабатическим? Выведите уравнение Пуассона.

3. Почему удельная теплоемкость газа при постоянном давлении больше теплоемкости при постоянном объеме? Выведите уравнение Роберта Майера.

4. Что такое число степеней свободы?

5. Как зависят C_p и C_v от числа степеней свободы молекул газа?

6. Оцените, измерение какой величины вносит наибольший вклад в погрешность измерения γ в данной работе.

Библиографический список

1. Савельев И.В. Курс физики. Т. 1. М.: Наука, 2005.
2. Трофимова Т.И. Курс общей физики. М.: Высшая школа, 2000, 2001.