

Лабораторная работа 1-27

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ВОЗДУХА C_p/C_v МЕТОДОМ

КЛЕМАНА-ДЕЗОРМА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение показателя адиабаты воздуха γ методом Клемана-Дезорма и сравнение полученного значения с теоретическим для двухатомного газа и с табличным значением для воздуха.

ЗАДАЧИ

1. Измерить избыток (над атмосферным) давления воздуха, созданный компрессором в закрытом сосуде.
2. Произвести адиабатическое расширение воздуха из сосуда при соединении его с атмосферой.
3. Произвести изохорический нагрев воздуха в закрытом сосуде при теплообмене его с окружающей средой.
4. Измерить избыток (над атмосферным) давления воздуха в закрытом сосуде после адиабатического расширения и изохорического нагрева.
5. Вычислить показатель адиабаты.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Одним из наиболее часто рассматриваемых в термодинамике процессов является **адиабатический** (адиабатный). Это такой термодинамический процесс в макроскопической системе (здесь речь будет идти о порции газа, воздуха), при котором система не получает и не отдаёт теплоты. Термин адиабатический (adiabatos = непроницаемый) предполагает, что система окружена непроницаемой для теплоты оболочкой.

Рассмотрим адиабатический процесс с точки зрения первого начала термодинамики:

$$\delta Q = dU + \delta A \quad (1)$$

где δQ - количество подведенной к системе теплоты, dU - изменение внутренней энергии системы и δA - элементарная работа, совершаемая системой над внешними телами. Для идеального газа (воздух в этой работе считается идеальным газом) уравнение адиабатического процесса ($\delta Q = 0$) принимает вид:

$$C_v dT + p dV = 0 \quad (2)$$

где C_v - теплоемкость системы при постоянном объеме V , T - температура, p - давление. Решением (2) является **уравнение адиабаты**:

$$pV^\gamma = \text{const} \quad (3)$$

где параметр $\gamma = C_p/C_v$ называется **показателем адиабаты**, а C_p - теплоемкость системы при постоянном давлении. В отношении C_p/C_v можно, в частности, использовать молярные теплоемкости $C_v = i R/2$ и $C_p = C_v + R = (i + 2)R/2$, где i - число степеней свободы молекул газа, $R = 8.31$ Дж/(моль·К) - универсальная газовая постоянная. Показатель адиабаты можно выразить

через число степеней свободы: $\gamma = (i + 2)/i$. Значения γ составляют: 1.67 для одноатомных ($i = 3$), 1.4 для двухатомных ($i = 5$) и 1.33 для многоатомных ($i = 6$) газов. Для смесей газов из молекул с разным числом степеней свободы γ усредняется и может принимать промежуточные значения.

Показатель адиабаты является важным физическим параметром газа. С его помощью можно определить, например, значения $C_v = R/(\gamma - 1)$, $C_p = \gamma R/(\gamma - 1)$ и скорость распространения звука

$$v_{\text{зв}} = \sqrt{\gamma RT/\mu} \quad (\mu - \text{молярная масса}).$$

Уравнение адиабаты можно выразить аналитически через другие пары термодинамических параметров, т.е. p - T или V - T (p^{-1}

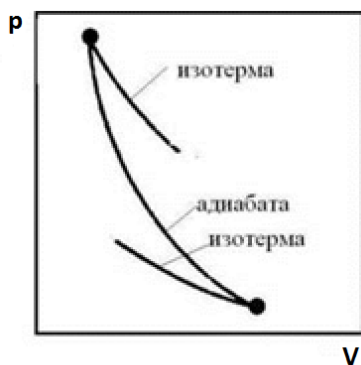


Рис. 1

Из соотношения (2) видно, что работа, которую выполняет газ при адиабатическом расширении, совершается за счет уменьшения его внутренней энергии, т.е. газ при этом охлаждается. При адиабатическом сжатии, наоборот, происходит нагрев газа. На графике это проявляется в том, что адиабата пересекает сетку изотерм (рис.1). Нагрев газа при адиабатическом сжатии легко обнаруживается при работе воздушного (напр., велосипедного) насоса, а в дизельных двигателях используется для воспламенения топливной смеси. Адиабатическое охлаждение применяется в разнообразных холодильных установках.

Второй способ легче реализовать технически, и поэтому он более распространен. Он заключается в том, что процесс проводят достаточно быстро для того, чтобы за время его протекания не успел произойти существенный теплообмен с окружающей средой. В то же время длительность процесса должна быть достаточной для установления *термодинамического равновесия* между отдельными частями данной порции газа. Теплоизоляция порции газа оказывается несущественной. С помощью такого процесса определяется показатель адиабаты в методе, предложенном в 19 веке французскими физиками Клеманом и Дезормом. Диаграмма процесса, который используется в методе Клемана-Дезорма, показана рис.2.



изотермы следует, что характеризующие их давления связаны соотношением $p_3^\gamma = p_0 p_1^{\gamma-1}$, логарифмируя которое можно найти показатель адиабаты γ .

Если выбрать степень расширения настолько малой, чтобы разность давлений $p' = p_1 - p_0 \ll p_0$, то тем более $p'' = p_3 - p_0 \ll p_0$ и показатель адиабаты может быть выражен приближенно через измеренные p' и p'' :

$$\gamma = \frac{p'}{p' - p''} \quad (4)$$

Схема установки, используемой в работе для реализации описанного выше процесса и измерения разностей давлений p' и p , показана на рис. 3, а общий вид установки на рис. 4.

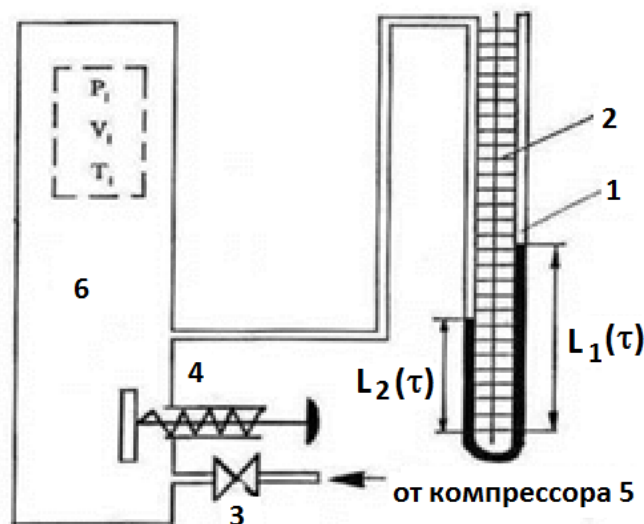


Рис. 3

сосуде и в помещении лаборатории (атмосферного давления). Эта разность уровней отсчитывается по измерительной линейке в мм масляного столба (1 мм масл. ст. ≈ 0.07 мм рт. ст. ≈ 9 Па).

Сосуд соединен также с клапаном сброса давления 4, рычаг которого выведен на переднюю панель. Компрессор при открытом кране 3 и закрытом клапане 4 создает в сосуде небольшой избыток давления воздуха p' над атмосферным давлением p_0 . Дифференциальный манометр может измерить величины избыточного давления до 300 мм масл. ст. (≈ 2700 Па), что обеспечивает выполнение условия $p' \ll p_0$. После закрытия крана 3 и достижения за несколько минут теплового равновесия воздуха со стенками баллона и окружающим воздухом (устанавливается состояние 1 на рис.2) открывается клапан 4 и происходит быстрое (адиабатическое) уменьшение давления в баллоне до атмосферного (устанавливается состояние 2 на рис.2 с температурой ниже исходной комнатной).

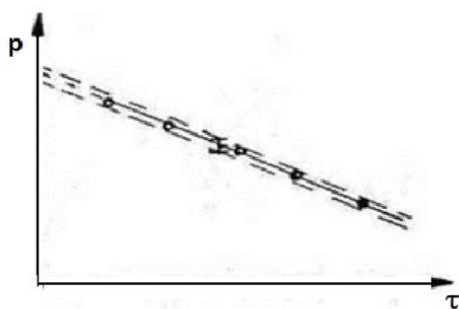


Рис. 5

Установка состоит из стеклянного баллона 6 емкостью около 10 л, который содержит исследуемый воздух. Баллон соединен пластмассовыми трубками (пневмопроводом) с микрокомпрессором 5 и U-образным масляным дифференциальным манометром 1. Микрокомпрессор расположен под кожухом установки и служит для нагнетания воздуха в сосуд. На передней панели расположены выключатель компрессора с индикатором и рукоятка крана 3, отсекающего сосуд от компрессора. Манометр представляет собой U-образную трубку, заполненную маслом, с измерительной линейкой 2. Разность уровней масла в двух коленях манометра пропорциональна разности давлений (дифференциальный манометр) воздуха в



Рис. 4

Далее клапан 4 закрывается, и оставшаяся в баллоне порция воздуха начинает нагреваться при постоянном объеме (объеме сосуда) за счет теплообмена с его стенками. Увеличение его давления при этом фиксируется по показаниям масляного манометра. Через несколько минут рост давления прекращается, что указывает на установление в сосуде состояния 3 (рис.2) с исходной (комнатной) температурой и давлением $p_0 + p''$. Основное затруднение в этом опыте представляет фиксация момента окончания адиабатического расширения. По показаниям манометра это сделать

невозможно из-за его инерционности (медленного перетекания масла между коленями). При слишком коротком времени нахождения клапана 4 в открытом состоянии воздух в баллоне не успевает понизить свое давление до атмосферного. При слишком длительном нахождении

клапана 4 в открытом состоянии нарушается условие адиабатичности (начинается теплообмен), и изображающая точка на рис.2 перемещается по изобаре $p = p_0$ вправо, попадая в состояния 4, 6 или 8. Далее при закрытом клапане воздух оказывается в состояниях 5, 7 или 9 с заниженными по сравнению с состоянием 3 значениями p'' . Поэтому значение p'' , соответствующее состоянию 3, следует определять из серии измерений при разных временах открытия клапана 4 с помощью графической экстраполяции (рис. 5).

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Убедитесь в работоспособности масляного манометра: масло в двух трубках должно находиться на одном уровне (около **150** мм по шкале измерительной линейки) после нажатия на рычаг выпускного клапана 4.
2. Установите кран 3 в закрытое состояние (его рукоятка в вертикальном положении).
3. Воткните вилку питания установки в сеть.
4. Включите компрессор. При этом должна загореться лампочка индикатора и появиться легкий шум.
5. Установите кран 3 в открытое состояние (рукоятка в горизонтальном положении) и наблюдайте за медленным подъемом уровня масла в правом колене манометра. При приближении разности уровней масла к заданному преподавателем значению (в диапазоне от 150 до 280 мм, не более) кран закрыть, затем выключить компрессор.
6. Выждите несколько минут (2 - 3 мин.) до установления теплового равновесия воздуха в баллоне с его стенками и окружающим воздухом. Показания манометра при этом должны перестать меняться.
7. Запишите показания манометра (уровни масла в правой и левой трубках) в таблицу в графы $L_{пр1}$ и $L_{лев1}$ (цифры в индексах соответствуют номеру точки на рис.2). Разность $L_{пр1}$ и $L_{лев1}$ может отличаться на несколько миллиметров от заданного преподавателем значения.
8. Нажмите на рычаг выпускного клапана 4, держите его в этом состоянии примерно 1 секунду ($\tau = 1$ с) и затем отпустите. Разность уровней масла в трубках манометра сначала скачком уменьшится, а затем начнет медленно повышаться.
9. Выждите несколько минут (до тех пор, пока уровни масла не перестанут меняться) и запишите эти уровни в таблицу в графы $L_{пр3}$ и $L_{лев3}$.
10. Повторите операции указанные в п.п.4 - 9 для значений времени выдержки клапана 4 в открытом состоянии (см. п.8) $\tau = 5$ с, 10 с, 15 с и 20 с.

Таблица 1. Показания дифференциального манометра в исходном состоянии и после изохорического нагрева.

Заданное значение $L_{пр1} - L_{лев1} = \dots\dots$ мм					
τ , с	1	5	10	15	20
$L_{пр1}$, мм					
$L_{лев1}$, мм					
$L_{пр3}$, мм					
$L_{лев3}$, мм					
γ					

11. Повторите п.п.4 - 10 для второго заданного значения $L_{пр1}$ и $L_{лев1}$ и запишите результаты в такую же таблицу (таблицу 2).
12. Для каждого столбца обеих таблиц вычислить значение показателя адиабаты γ по формуле:

$$\gamma = \frac{L_{пр1} - L_{лев1}}{L_{пр1} - L_{лев1} - (L_{пр3} - L_{лев3})} \quad (5)$$

В этой формуле $L_{пр1} - L_{лев1} = p'$ и $L_{пр3} - L_{лев3} = p''$, выраженные в мм масл. ст.

13. Построить график зависимости $\gamma(\tau)$, аналогичный графику на рис.4, найти на нем линейный участок и экстраполировать его к значению $\tau = 0$, т.е. найти его точку пересечения с осью γ . Принять это значение за среднее значение показателя адиабаты.
14. Оценить графически погрешность γ .

15. По формуле $\Delta T = T \cdot \frac{p''}{p_0}$, которая следует из уравнения изохоры, оценить насколько охлаждается воздух в условиях проведенного опыта. Здесь $T \approx 300$ К - комнатная температура, $p'' = L_{\text{прз}} - L_{\text{левз}}$ (в мм масл. ст.) и $p_0 \approx 1.1 \cdot 10^4$ мм масл. ст. - атмосферное давление.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ

1. Что такое адиабатический процесс?
2. Какие значения может принимать показатель адиабаты?
3. Как действует масляный манометр?
4. Какие применения находят адиабатическое нагревание и охлаждение?
5. В каких природных явлениях проявляется адиабатическое охлаждение?

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Р.В. Общий курс физики: в 3 т. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика. М., 1976.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. М., 1998 2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М., 1987.