

Лабораторная работа 1.15.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ВОЗДУХА

Е.В. Жданова, М.М. Зверев, О.А. Рубан.

Цель работы: изучение термодинамических процессов в идеальном газе и определение показателя адиабаты воздуха.

Задание: выполнить эксперимент по определению показателя адиабаты воздуха. Рассчитать на основании проведенных измерений показатель адиабаты воздуха. Сравнить с теоретическим значением. Определить погрешность измерений.

Подготовка к выполнению работы: изучить понятия идеального газа, теплоемкостей, свойства процессов идеального газа, первый закон термодинамики и основы молекулярно-кинетической теории газов. Ознакомиться с установкой.

Библиографический список.

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3-х томах. Том 1. Механика. Молекулярная физика. - СПб.: Издательство «Лань», 2018, гл. 10, §§ 86-89; гл. 7, §§ 49, 50, 52, 53.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Издательский центр «Академия», 2019, гл. 8, §§ 41, 42; гл. 9, §§ 53-55.

Контрольные вопросы.

1. Дайте определение идеального газа.
2. Напишите уравнение состояния идеального газа.
3. Какие процессы называются изопроцессами?
4. Какие процессы являются равновесными?
5. Что такое адиабатический процесс? Напишите уравнение адиабаты.
6. Сформулируйте первый закон термодинамики.
7. Что такое внутренняя энергия тела, идеального газа?
8. Что называется теплоемкостью тела, удельной теплоемкостью, молярной теплоемкостью?
9. Почему молярная теплоемкость C_p всегда больше C_v ? Чему равна их разность?
10. Запишите выражение для внутренней энергии идеального газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории и термодинамики.
11. Что называется числом степеней свободы молекулы?

12. Сформулируйте закон о равномерном распределении энергии по степеням свободы молекул.
13. Чему равно число степеней свободы для одно-, двух-, трехатомных молекул?
14. Как связаны C_p и C_v с числом степеней свободы молекул?
15. Выведите уравнение адиабаты.
16. Чему равна теплоемкость идеального газа при адиабатическом процессе?
17. Как определяется показатель адиабаты воздуха в этой работе?
18. Напишите уравнение гармонических собственных колебаний и его решение.

Теоретическое введение.

Адиабатный (или адиабатический) процесс – идеальный термодинамический процесс в макроскопической системе, протекающий без теплообмена с окружающей средой. Для идеального газа этот процесс помимо уравнения состояния идеального газа (уравнения Клапейрона – Менделеева)

$$PV = \frac{m}{\mu} RT, \quad (1)$$

описывается уравнением адиабаты

$$PV^\gamma = \text{const}. \quad (2)$$

В этих уравнениях P – давление, V – объем, T – абсолютная температура газа, R – универсальная газовая постоянная, μ – молярная масса газа, m – масса газа (причем $m = \text{const}$), γ – показатель адиабаты.

Идеальный газ – это идеализированная модель газа, которая предполагает, что потенциальной энергией взаимодействия молекул можно пренебречь по сравнению с кинетической энергией их движения. Модель идеального газа можно использовать при изучении разреженных реальных газов, если 1) плотность реального газа настолько мала, что суммарным объемом молекул газа можно пренебречь по сравнению с объемом сосуда, т.е. молекулы можно рассматривать как материальные точки, а взаимодействия молекул со стенками сосуда и между собой считать абсолютно упругими; 2) в газе не происходит химических реакций. Такие газы, как воздух, азот, кислород даже при обычных условиях, т.е. при комнатной температуре и нормальном давлении мало отличаются от идеального газа.

Для идеального газа показатель адиабаты γ определяется выражением

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}, \quad (3)$$

где C_P – молярная теплоемкость газа при процессе, происходящем при постоянном давлении, а C_V – молярная теплоемкость газа при процессе, происходящем при постоянном объеме.

Молярной теплоемкостью C называется физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое нужно сообщить одному молю вещества, чтобы изменить его температуру на один градус кельвина. Кроме молярной теплоемкости, используют понятия теплоемкости тела C_T и удельной теплоемкости c (теплоемкости единицы массы вещества). Они связаны следующим очевидным соотношением

$$C_T = \frac{m}{\mu} C = mc \quad (4)$$

откуда

$$c = \frac{C_T}{m}. \quad (5)$$

На основании (3), (4), (5) для идеального газа имеем

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{c_P}{c_V} = \frac{C_{PT}}{C_{VT}}. \quad (6)$$

Из молекулярно-кинетической теории газов и термодинамики следует, что

$$C_P = C_V + R, \quad (7)$$

$$C_V = \frac{i}{2} R, \quad (8)$$

$$C_P = \frac{i+2}{2} R. \quad (9)$$

Подставляя выражения (8), (9) в (3), получаем

$$\gamma = \frac{i+2}{i}, \quad (10)$$

где $i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вр}} + 2i_{\text{кол}}$ – сумма поступательных, вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы молекулы. Число степеней свободы молекулы это число независимых переменных (координат), необходимых для однозначного определения положения молекулы в пространстве.

При нормальных условиях ($P = 760 \text{ мм Нг} = 1,01 \times 10^5 \text{ Па}$, $T = 300 \text{ К}$) воздух ведет себя как идеальный газ, состоящий из двухатомных молекул с жёсткой связью, т.е. колебательными степенями свободы таких молекул можно пре-

небредь ($i_{\text{кол}} = 0$). Такие молекулы кроме трёх степеней свободы поступательного движения имеют ещё две степени свободы вращательного движения. Вращение вокруг третьей оси (оси, проходящей через оба атома) лишено смысла для точечных атомов, в этом случае говорят, что третья вращательная степень свободы вырождена. Таким образом, молекулы двухатомных газов при нормальных условиях обладают пятью степенями свободы ($i=5$). Поэтому для воздуха при нормальных условиях

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i} = \frac{7}{5} = 1,4. \quad (11)$$

В данной работе показатель адиабаты воздуха определяется следующим образом. Рассмотрим сосуд (рис. 1), наполненный воздухом.

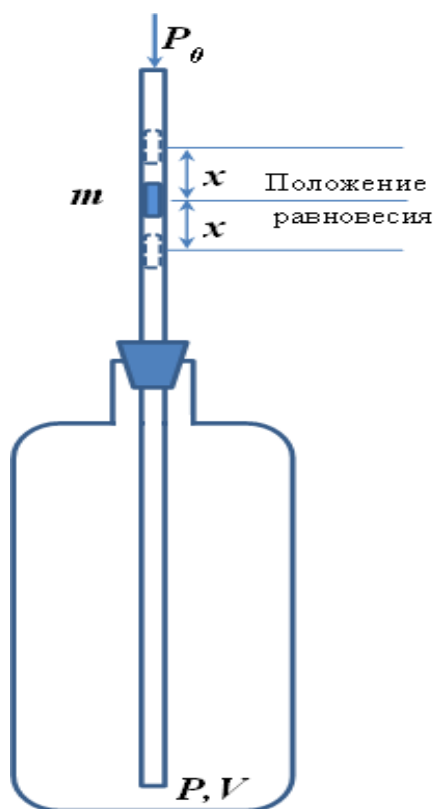


Рис. 1

Цилиндрическая стеклянная трубка с внутренним диаметром D герметично соединена с сосудом. Внутри трубки располагается поршень. Поршень плотно прилегает к стенкам трубки и образует воздухонепроницаемое уплотнение. Выведение поршня из положения равновесия вызывает периодическое расширение или сжатие воздуха под поршнем, что приводит к тому, что давление внутри сосуда становится то выше, то ниже атмосферного. В результате, возникает сила, стремящаяся вернуть поршень в положение равновесия, и пор-

шень будет совершать колебательные движения. Поскольку теплообмен с окружающей средой практически отсутствует, эти колебания связаны с адиабатическим изменением состояния воздуха под поршнем, которое описывается уравнением (2).

В положении равновесия давление P внутри сосуда уравнивается атмосферным давлением P_0 и давлением поршня, которое равно $P_{\Pi} = mg/S$, где m – масса поршня, g – ускорение свободного падения, S – площадь поперечного сечения трубки, т. е.

$$P = P_0 + P_{\Pi} = P_0 + \frac{mg}{S}. \quad (12)$$

При смещении поршня из положения равновесия на расстояние x на него действует возвращающая сила $F = -\Delta P S$, где ΔP – изменение давления газа под поршнем. Поскольку процесс адиабатический, то ΔP найдём, используя уравнение адиабаты (2). Дифференцируя (2), имеем

$$dP + \gamma \frac{P}{V} dV = 0 \quad (13)$$

и, переходя к конечным приращениям ΔP и ΔV , получим

$$\Delta P = -\gamma \frac{P}{V} \Delta V. \quad (14)$$

Выражение (14) справедливо, когда $\Delta V \ll V$. Учитывая, что $\Delta V = xS$, запишем

$$\Delta P = -\gamma \frac{P}{V} xS. \quad (15)$$

Тогда уравнение движения поршня (2-й закон Ньютона) без учета сил трения имеет вид

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -\gamma \frac{PS^2}{V} x$$

или

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \gamma \frac{PS^2}{mV} x = 0. \quad (16)$$

Решение дифференциального уравнения (16) описывает свободные гармонические колебания с круговой (циклической) частотой

$$\omega_0 = \sqrt{\gamma \frac{PS^2}{mV}} \quad (17)$$

и периодом

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{mV}{\gamma PS^2}}. \quad (18)$$

Измерив период колебаний поршня T_0 , из выражения (18) можно определить значение показателя адиабаты воздуха

$$\gamma = \frac{(2\pi)^2}{T_0^2} \frac{mV}{PS^2}. \quad (19)$$

Так как круговое сечение трубки с диаметром D равно $S = \pi D^2/4$, то окончательно имеем

$$\gamma = \frac{64mV}{PT_0^2 D^4}. \quad (20)$$

Описание аппаратуры и методики измерений.

Схема установки, с помощью которой проводятся измерения, приведена на рис. 2. Стекланный сосуд объёмом 10 литров герметично соединен с вертикально расположенной стеклянной трубкой небольшого поперечного сечения. Внутри трубки расположен алюминиевый поршень. Зазор между боковой поверхностью поршня и трубкой очень мал; при выведении из положения равновесия поршень приходит в колебательное движение - совершает около 10 полных колебаний. Ручной насос позволяет управлять положением поршня в трубке.

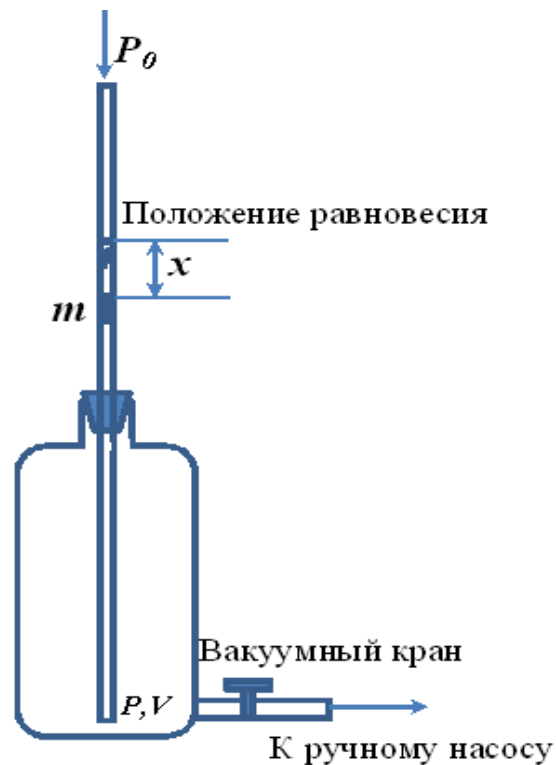


Рис. 2

Период колебаний измеряется с помощью секундомера. Поршень совершает затухающие колебания, однако, как показывает расчёт, их период T не-

значительно (на доли процента) отличается от периода собственных колебаний T_0 (18). Поэтому для расчёта показателя адиабаты можно с большой степенью точности (превышающей точность измерений) пользоваться итоговой формулой (20).

Порядок выполнения работы.

1. Записать данные, указанные на установке (V – объем сосуда, D – диаметр трубки, m – масса поршня). Уточнить значения давления и температуры;
2. Начертить таблицу 1, куда занести результаты измерений. Здесь n – номер измерения, N - число полных колебаний поршня, t - полное время колебаний, T - период колебаний.

Таблица 1

n									
N									
$t, \text{с}$									
$T, \text{с}$									

3. Снять пробку с верхнего конца трубки. Открыть вакуумный кран. Подготовить секундомер.
4. Убедиться, что переключатель ручного насоса находится в положении «давление» и, осторожно работая рычагом ручного насоса, понемногу увеличивать давление в сосуде; добиться того, чтобы поршень, находящийся в нижнем конце трубки, начал двигаться вверх. Когда поршень достигнет верхнего конца трубки, вынуть его из трубки, при этом давление в сосуде сравняется с атмосферным. **Внимание! Не допускать падения поршня на пол!** Закрыть кран. Аккуратно вставить поршень в трубку, придерживая его за верхний край.
5. Отпустить поршень. Когда поршень будет находиться в одном из крайних положений, включить секундомер. Отсчитать от 5 до 10 полных колебаний поршня и выключить секундомер. Записать показания в таблицу.
6. Измерения, описанные в пунктах 4 и 5, повторить не менее 10 раз. В каждой серии измерений количество колебаний поршня должно быть постоянным.

Обработка результатов измерений.

1. Для каждого измерения найти период колебаний поршня T .
2. Убедиться, что выполняется условие $\Delta V \ll V$ (V - объем сосуда, ΔV – из-

менение объема газа при колебаниях поршня).

3. Найти средний период колебаний $T_{\text{ср}}$ и по формуле (20) вычислить показатель адиабаты γ для воздуха.
4. Сравнить полученное значение γ с расчетным (11), считая воздух идеальным газом, состоящим из двухатомных жестких молекул.
5. Рассчитать относительную погрешность измерений, пользуясь выражением

$$E = \frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta P}{P} + 2\frac{\Delta T}{T} + 4\frac{\Delta D}{D}, \quad (21)$$

где ΔT рассчитать как погрешность прямого многократного измерения. Формулу (21) можно получить, используя соотношения (20) в соответствии с методикой оценки погрешностей косвенных измерений.

6. Записать результат с учётом погрешности измерений в виде

$$\gamma = \gamma_{\text{ср}} \pm \Delta\gamma.$$

7. Сделать вывод по полученным результатам.