Энгельсский технологический институт (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Кафедра «Естественных и математических наук»

ФИЗИКА

Методические указания к
выполнению лабораторной работы
“ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ”

для студентов направлений

09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»
09.03.04 «Программная инженерия»
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»
15.03.05 «Конструкторско-технологическоеобеспечение машиностроительных производств»
18.03.01 «Химическая технология»
23.03.01 «Нефтегазовое дело»
29.03.05 «Конструирование изделий легкой промышленности»

очной и заочной формы обучения

Энгельс 2024

Цель работы: изучение процессов в идеальных газах, определение отношения теплоемкостей $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$.

Теория метода

Удельной теплоемкостью вещества называется величина, равная количеству теплоты, которую необходимо сообщить единице массы вещества для увеличения ее температуры на один Кельвин:

$$C = \frac{\delta Q}{m dT} \qquad (1)$$

Теплоемкость одного моля вещества называется молярной теплоемкостью:

$$\mu C = \frac{\delta Q}{\frac{m}{\mu} dT} \qquad (2)$$

где m – масса, μ – молярная масса вещества.

Значение теплоемкости газов зависит от условий их нагревания. Согласно с первым законом термодинамики количество теплоты δQ, сообщенное системе, расходуется на увеличение внутренней энергии dU и на выполнение системой работы δA против внешних сил:

$$\delta Q = dU + \delta A \qquad (3)$$

Увеличение внутренней энергии идеального газа в случае изменения его температуры на dT:

$$dU = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{i}{2} \cdot R \cdot dT \qquad (4)$$

Здесь i – число степеней свободы молекулы, под которым подразумевается число независимых координат, определяющих положение молекулы в пространстве: i=3 – для одноатомной; i=5 – для двухатомной; i=6 – для трех- и многоатомной, R – универсальная газовая постоянная; $R = 8{,}31$ Дж/(моль · К).

При расширении газа система выполняет работу:

$$\delta A = p dV \qquad (5)$$

Если газ нагревать при постоянном объеме $V = const$, то $\delta A = 0$ и согласно с (3) все полученное газом количество теплоты расходуется только на увеличение его внутренней энергии $\delta Q_V = dU$ и, учитывая (4), молярная теплоемкость идеального газа при постоянном объеме

$$\mu C_V = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2} \cdot R \qquad (6)$$

Если газ нагревать при постоянном давлении $P = const$, то полученное газом количество теплоты расходуется на увеличение внутренней энергии dU и выполнение работы δA

$$\delta Q_P = dU + PdV$$

Тогда молярная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении

$$\mu C_P = \frac{dU}{dT} + P \cdot \left(\frac{dV}{dT}\right)_P \qquad (7)$$

Используя уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона-Менделеева)

$$pV = \frac{m}{\mu} \cdot RT$$

можно доказать, что для моля газа

$$P \cdot \left(\frac{dV}{dT}\right)_P = R$$

и, поэтому

$$\mu C_P = \mu C_V + R = \frac{i+2}{2} \cdot R \qquad (8)$$

Отношение теплоемкостей:

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i} \qquad (9)$$

Адиабатным называется процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой, $\delta Q = 0$.

На практике он может быть осуществлен в системе, окруженной теплоизоляционной оболочкой, но поскольку для теплообмена необходимо

некоторое время, то адиабатным можно считать также процесс, который протекает так быстро, что система не успевает вступить в теплообмен с окружающей средой. Первый закон термодинамики с учетом (4) – (6) для адиабатного процесса имеет вид:

$$\frac{m}{\mu} \cdot \mu \cdot C_V \cdot dT = -PdV \qquad (10)$$

Продифференцировав уравнение Клапейрона-Менделеева

$$PdV + VdP = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot dT$$

и подставляя dT в формулу (10), получим

$$(\mu C_V + R)PdV + \mu C_V VdP = 0$$

Учитывая соотношение между молярными теплоемкостями идеального газа при постоянном давлении и объеме, которое описывается формулой Майера (8), а также (9), получим

$$\gamma \frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0$$

Решение написанного дифференциального уравнения имеет вид

$$PV = const \qquad (11)$$

Уравнение (11) называется уравнением адиабаты (уравнением Пуассона), а введенная в (9) величина γ – показателем адиабаты.

Метод определения показателя адиабаты, предложенный Клеманом и Дезормом (1819 г.), основывается на изучении параметров некоторой массы газа, переходящей из одного состояния в другое двумя последовательными процессами – адиабатным и изохорным. Эти процессы на диаграмме P-V (рис.1) изображены кривыми соответственно 1-2 и 2-3. Если в сосуд, соединенный с дифференциальным датчиком давления, накачать воздух и подождать до установления теплового равновесия с окружающей средой, то в этом начальном состоянии 1 газ имеет параметры P_1, V_1, T_1, причем температура газа в сосуде равна температуре окружающей среды $T_1 = T_0$, а давление $P_1 = P_0 + P'$ немного больше атмосферного.

Если теперь на короткое время соединить сосуд с атмосферой, то произойдет адиабатное расширение воздуха. При этом воздух в сосуде перейдет в состояние 2, его давление понизится до атмосферного $P_2 = P_0$. Масса воздуха, оставшегося в сосуде, которая в состоянии 1 занимала часть объема в сосуде, расширяясь, займет весь объем V_2. При этом температура воздуха, оставшегося в сосуде, понизится до T_2. Поскольку процесс 1-2 – адиабатный, к нему можно применить уравнение Пуассона (11):

$$P_1 V_1^{\gamma} = P_2 V_2^{\gamma}$$

или

$$\frac{T_1^{\gamma}}{P_1^{\gamma-1}} = \frac{T_2^{\gamma}}{P_2^{\gamma-1}}$$

Отсюда

$$\left(\frac{P_0 - P'}{P_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_0}{T_2}\right)^{\gamma} \qquad (12)$$

После кратковременного соединения сосуда с атмосферой охлажденный из-за адиабатного расширения воздух в сосуде будет нагреваться (процесс 2-3) до температуры окружающей среды $T_3 = T_0$ при постоянном объеме $V_3 = V_2$. При этом давление в сосуде поднимется до $P_3 = P_2 + P$.

Поскольку процесс 2-3 – изохорный, к нему можно применить закон Шарля:

$$\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3}$$

Отсюда

$$\frac{P_0 + P''}{P_0} = \frac{T_0}{T_2} \qquad (13)$$

Из уравнений (12) и (13) получим:

$$\left(\frac{P_0 + P'}{P_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{P_0 + P''}{P_0}\right)^{\gamma}$$

Прологарифмируем:

$$(\gamma - 1)\ln\left(1 + \frac{P'}{P_0}\right) = \gamma ln\left(1 + \frac{P''}{P_0}\right)$$

Поскольку избыточные давления P' и P'' очень малы по сравнению с атмосферным давлением P_0 и, учитывая, что при $x \ll 1$ $\ln(1 + x) \approx x$, будем иметь

$$(\gamma - 1)P' = \gamma P''$$

Откуда

$$\gamma = \frac{P'}{P' - P''} \qquad (14)$$

Избыточные давления P' и P'' измеряют с помощью дифференциального датчика давления:

$$P' = pgH;\ P'' = pgH \qquad (15)$$

Из (14) и (15) получим расчетную формулу для определения γ:

$$\gamma = \frac{H}{H - h} \qquad (16)$$

Экспериментальная установка

Для определения отношения теплоемкостей воздуха $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$ предназначена экспериментальная установка ФПТ1-6, общий вид которой показан на рисунке 2.

Установка состоит из металлического сосуда емкостью 3,5 литра, соединенной с микрокомпрессором, размещенным в блоке приборов 2. Микрокомпрессор включается переключателем «Микрокомпрессор», установленным на передней панели установки 5. Пневмотумблер «Атмосфера» 6, позволяет при повороте его по часовой стрелке до щелчка кратковременно соединить колбу с атмосферой.

Давление в колбе измеряется дифференциальным датчиком давления типа MPX5010dp. В установке предусмотрен также контроль температуры как внутри колбы, так и снаружи.

Порядок выполнения работы

1. Включить установку выключателем «Сеть». Открыть кран К1.
2. Для подачи воздуха в сосуд включить переключатель «Микрокомпрессор».
3. С помощью измерительного прибора «Давление» контролируют давление в сосуде. Когда давление в сосуде достигнет P_1 кПа, закрыть кран К1 и отключить подачу воздуха.
4. Подождать 2…3 минуты, пока температура воздуха в сосуде сравняется с температурой окружающего воздуха T_0, в сосуде при этом установится постоянное давление P_1. Снять показания измерителя давления P_1, установившегося в сосуде, а полученное значение занести в таблицу:

Таблица 1

№ изм.	P_1, кПа	P_2, кПа	γ
1			
2			
…			

5. На короткое время соединить сосуд с атмосферой, повернув пневмотумблер «Атмосфера» по часовой стрелке до щелчка.
6. Через 2…3 минуты, когда в сосуде установится постоянное давление P_2 снять показания измерителя давления P_2, установившегося в сосуде и полученное значение занести в таблицу 1.
7. Повторить измерения по пунктам 2-6 не менее 10 раз при различных значениях величины P_1.
8. Выключить установку выключателем «Сеть».

Обработка результатов измерения

1. Для каждого измерения определить по формуле (14) отношение теплоемкостей γ. Найти среднее значение γ.

2. Оценить погрешность результатов измерения.

Рисунок 2 Общий вид экспериментальной установки ФПТ1-6Н

1 -зона управления, 2 – приборная зона, 3 – информационная зона, 4 – включатель сети, 5 – включатель компрессора, 6 – клапан соединения с атмосферой, 7 – измерители температуры, 8 – измеритель давления

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое изопроцессы и каким законам они подчиняются? Нарисуйте графики этих процессов.

2. Сформулируйте 1 закон термодинамики. Запишите этот закон для изобарного, изохорного, изотермического и адиабатного процессов.

3. Дайте определение удельной и молярной теплоемкости. В каких единицах СИ они измеряются?

4. В чем особенности теплоемкости газа? Выведите формулу для молярных теплоемкостей μC_V и μC_P идеального газа.

5. Дайте определение числа степеней свободы молекулы. Чему равна величина i для 1-, 2-, и 3- многоатомного идеальных газов?

6. Какой процесс называется адиабатным? Выведите уравнение Пуассона.

7. Рассчитайте теоретическое значение показателя адиабаты для 1-, 2- и 3- атомного идеального газа.

8. В чем заключается метод Клемана и Дезорма для определения $\frac{C_P}{C_V}$?

9. Опишите рабочий цикл экспериментальной установки по P-V диаграмме.

10. Выведите расчетную формулу для определения γ.

11. Как и почему изменяется температура газа в сосуде при проведении опыта?

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики: в 3 т./И.В. Савельев. М.: Наука, 1998. Т.1.

2. Яворский Б.М. Курс физики: в 3 т./Б.М. Яворский, А.А. Детлаф, Л.И. Милковская. М.: Высшая школа, 1999. Т.2.

3. Трофимова Т.И. Курс физики/Т.И. Трофимова. М.: Высшая школа, 2002.

4. Учебные анимированные клипаты по физики ЭТИ СГТУ [Электронный ресурс] http://tfi.sstu.ru/

5. http://www.sstu.ru/studentu/

6. http://techn.sstu.ru/Biblioteka/

7. http://techn.sstu.ru/new/SubjectFGOS/SpisokPredmetow.aspx