

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Томский государственный университет систем управления и радио-
электроники
(ТУСУР)

Кафедра физики

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗА МЕТОДОМ КЛЕМАНА-ДЕЗОРМА

Руководство к лабораторной работе по физике
для студентов всех специальностей

РАЗРАБОТЧИКИ

Доцент каф. физики

_____ Е. В. Иванова

« ____ » _____ 2012года

_____ И.В. Соколова

« ____ » _____ 2012 года

2012

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных тепловых свойств тел, широко используемых в термодинамическом исследовании, является теплоемкость. Значение теплоемкости зависит от вида процесса, приводящего к переходу системы из одного состояния в другое. Примерами простейших термодинамических процессов могут служить следующие:

- 1) изотермический процесс, при котором температура системы не изменяется ($T=\text{const}$);
- 2) изохорический процесс, происходящий при постоянном объеме системы ($V=\text{const}$);
- 3) изобарический процесс, происходящий при постоянном давлении в системе ($P=\text{const}$).

Целью данной работы является изучение адиабатического и изохорического процессов в газах, определение отношения теплоемкостей (коэффициента Пуассона) и числа степеней свободы.

1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Для тех макроскопических явлений, в которых одним из существенных параметров, определяющих состояние тел, является температура, первое начало термодинамики выражает закон сохранения и превращения энергии. Его можно сформулировать следующим образом: количество теплоты, сообщенное системе в процессе теплообмена (δQ) идет на изменение ее внутренней энергии (dU) и на совершение системой работы против внешних сил (δA).

$$\delta Q = dU + \delta A \quad (1.1)$$

Изменение внутренней энергии определенной массы идеального газа при изменении его температуры на dT градусов определяется по формуле:

$$dU = \frac{M}{\mu} \frac{i}{2} R dT, \quad (1.2)$$

где M – масса газа; μ – молярная масса; i – число степеней свободы молекулы газа; R – универсальная газовая постоянная.

Элементарная работа δA при изменении объема равна:

$$\delta A = P dV, \quad (1.3)$$

где P – давление газа; dV – изменение объема газа. Теплоемкостью какого-либо тела называется величина, численно равная количеству теплоты, которое нужно сообщить телу, чтобы повысить температуру на один градус. Аналитически для удельной теплоемкости это определение записывается следующим образом:

$$c_{\text{уд}} = \frac{\delta Q}{M \cdot dT}, \quad (1.4)$$

где δQ – количество теплоты, необходимое для изменения температуры единицы массы газа на dT градусов. Будем далее обозначать эту теплоемкость строчной буквой c . Измеряется она в джоулях на килограмм-кельвин (Дж/(кг·К)).

Молярная теплоемкость – теплоемкость моля этого вещества:

$$C = \frac{\mu \cdot \delta Q}{M \cdot dT}. \quad (1.5)$$

Обозначать эту теплоемкость будем прописной буквой C , измеряется она в джоулях на моль-кельвин (Дж/(моль·К)).

Теплоемкость зависит от условий, при которых происходит нагревание тела, т.е. от характера процесса перехода системы из одного состояния в другое. Наибольший интерес представляет теплоемкость для случаев, когда нагревание производится при постоянном объеме или при постоянном давлении. В первом случае мы имеем дело с теплоемкостью при постоянном объеме (обозначается c_v), во втором – с теплоемкостью при постоянном давлении (c_p). Вычислим c_v (процесс изохорический). Для этого подставим выражения (1.2) и (1.3) в формулу первого начала термодинамики и получим:

$$\delta Q = \frac{M}{\mu} \frac{i}{2} R \cdot dT + P \cdot dV. \quad (1.6)$$

Для изохорического процесса $P \cdot dV = 0$, так как $dV = 0$ и, следовательно,

$$\delta Q = \frac{M}{\mu} \frac{i}{2} R \cdot dT. \quad \text{Подставив данный результат в уравнение (1.5),}$$

найдем, что молярная теплоемкость при постоянном объеме равна

$$C_v = \frac{i}{2} R. \quad (1.7)$$

Аналогично вычислим C_p , предварительно рассчитав $P \cdot dV$. Для изобарического процесса $P \cdot dV = \frac{M}{\mu} R \cdot dT$. Тогда

$$\delta Q = \frac{M}{\mu} \frac{i}{2} R \cdot dT + \frac{M}{\mu} R \cdot dT = \frac{M}{\mu} R \left(\frac{i}{2} + 1 \right) dT, \quad \text{следовательно,}$$

$$C_p = R \left(\frac{i}{2} + 1 \right). \quad (1.8)$$

Сопоставляя выражения (1.7) и (1.8), получаем уравнение Майера

$$C_p = C_v + R. \quad (1.9)$$

Введем обозначение $C_p/C_v = \gamma$. Подставив в отношение для γ выражения для C_p и C_v , получим зависимость коэффициента γ от числа степеней свободы

$$\gamma = \frac{i+2}{i} \quad (1.10)$$

Теплоемкости C_p и C_v для идеальных газов могут зависеть от температуры. Но во многих случаях они остаются практически постоянными в широких температурных интервалах. Отношение теплоемкости при постоянном давлении C_p к теплоемкости при постоянном объеме C_v называется коэффициентом Пуассона (γ). Для газов теплоемкость при постоянном давлении больше теплоемкости при постоянном объеме $C_p > C_v$, так как при нагревании газа при постоянном давлении (изобарический процесс) подведенное к газу тепло идет на увеличение его внутренней энергии (а, следовательно, и температуры) и на совершение газом работы расширения для поддержания постоянного давления. Например, если газ заключен в сосуд с подвижным поршнем, обеспечивающим постоянное давление, то, нагреваясь, он расширяется и поднимает поршень, совершая таким образом работу против внешних сил. При нагревании при постоянном объеме (изохорический процесс) все тепло, подведенное к газу, идет на увеличение только его внутренней энергии.

Коэффициент Пуассона называется также показателем адиабаты, так как он входит в уравнение Пуассона

$$PV^\gamma = const, \quad (1.11)$$

которое характеризует адиабатический процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой $\delta Q=0$.

Зная величину γ , можно определить число степеней свободы молекулы газа и, следовательно, в самых общих чертах, ее структуру. Для одноатомного газа $i=3$, для двухатомного $i=5$, для молекул, состоящих из трех и более атомов, $i=6$. Если правую и левую части уравнения Клапейрона-Менделеева, связывающего параметры P, V и T какого-либо состояния газа, поделить на массу газа, то получим

$$P \frac{V}{M} = \frac{RT}{\mu}, \quad (1.12)$$

где величина V/M называется удельным объемом газа. В дальнейшем будем обозначать ее $V_{уд}$. Можно легко показать, что уравнение Бойля-Мариотта и Пуассона справедливы и для случая, когда вместо объема газа V записывается в них $V_{уд}$.

Таким образом, значение γ определяется числом степеней свободы идеального газа. Коэффициент Пуассона γ для каждого газа является одной из его важнейших физических постоянных.

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ

Величину коэффициента Пуассона γ можно определить с помощью прибора Клемана и Дезорма, схема которого изображена на рисунке 2.1.

На рисунке 2.2 представлен вид экспериментальной установки

Для определения отношения теплоемкостей $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ для газа (возду-

ха), находящегося в баллоне, с ним проводят последовательность термодинамических процессов. Они представлены на $P-V_{уд}$ – диаграмме на рисунке 2.3. Обозначим через P_0, V_0, T_0 исходные величины термодинамических параметров газа в баллоне. Сначала в баллон накачивается воздух насосом (достаточно быстро), процесс 1-2. при этом газ в баллоне сжимается и нагревается (выше комнатной температуры). После изохорического остывания до начальной комнатной температуры (процесс 2-3) газ имеет некоторое давление P_1 (выше атмосферного) и температуру T_0 .

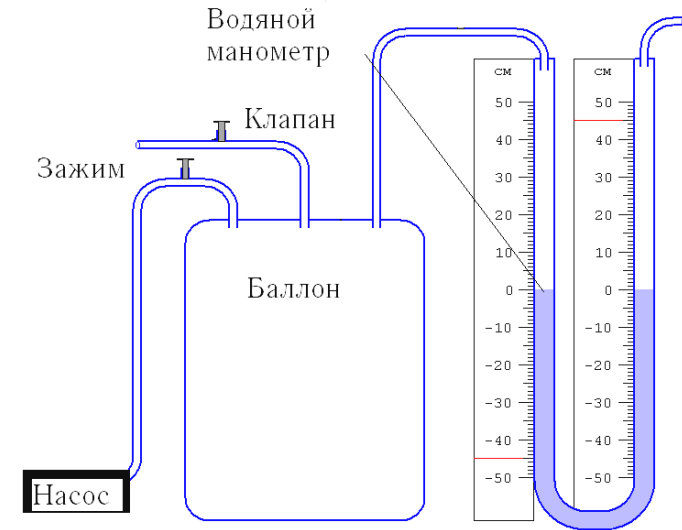


Рисунок 2.1 Схема экспериментальной установки

Для определения отношения теплоемкостей $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ для газа (воз-

духа), находящегося в баллоне, с ним проводят последовательность термодинамических процессов. Они представлены на $P-V_{уд}$ – диаграмме на рисунке 2.3. Обозначим через P_0, V_0, T_0 исходные величины термодинамических параметров газа в баллоне. Сначала в баллон накачивается воздух насосом (достаточно быстро), процесс 1-2. при этом газ в баллоне сжимается и нагревается (выше комнатной температуры). После изохорического остывания до начальной комнатной температуры (процесс 2-3) газ имеет некоторое давление P_1 (выше атмосферного) и температуру T_0 . Затем открывают клапан, соединяя баллон с атмосферой, и газ адиабатически расширяется (процесс 3-4).

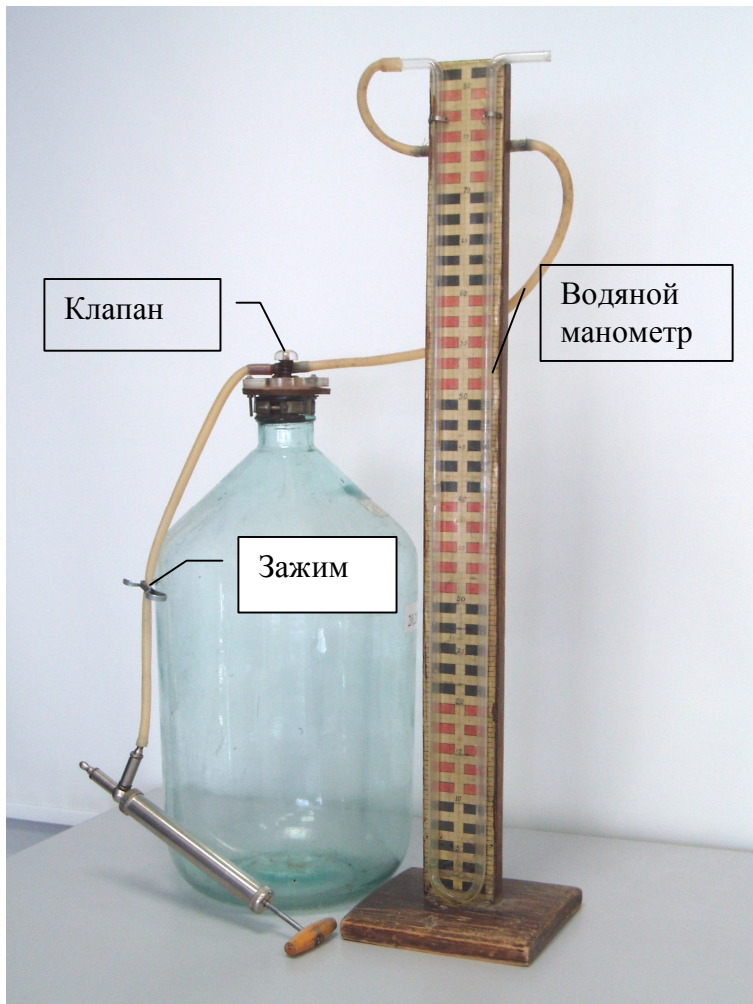


Рисунок 2.2 – Вид экспериментальной установки
Газ при этом охлаждается (ниже комнатной температуры), его давление падает до величины P_0 .

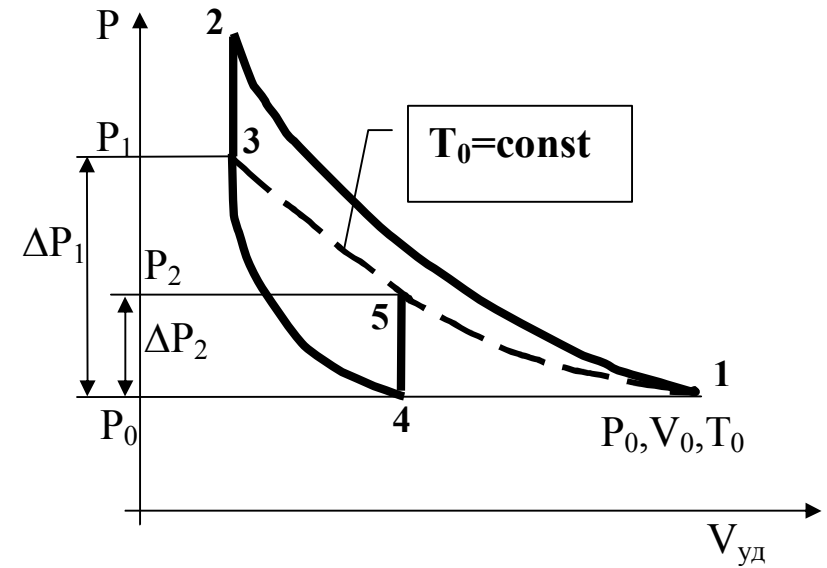


Рисунок 2.3- P-V_{уд} диаграмма процессов в газе

В момент достижения давления P_0 клапан закрывается (быстро), и газ изохорически нагревается до комнатной температуры (процесс 4-5). В конечном состоянии давление газа $P_2 > P_0$, а температура равна комнатной T_0 .

Масса газа, находящегося в баллоне, в начальном состоянии выражается соотношением:

$$M_0 = \frac{P_0 V_0}{RT_0} \mu. \quad (2.1)$$

В течение всех рассмотренных термодинамических процессов масса газа в баллоне больше или равна M_0 . Назовем массу M_0 рабочей массой газа. Эта масса остается все время в баллоне. Накачиваемый и выпускаемый из баллона газ служит лишь для сжатия и расширения рабочей массы газа. Введем обозначения

$\Delta P_1 = P_1 - P_0$ и $\Delta P_2 = P_2 - P_0$. Разности давлений значительно меньше атмосферного давления P_0 : $\Delta P_1 \ll P_0$ и $\Delta P_2 \ll P_0$.

Воспользовавшись уравнением Пуассона (1.11), можно показать, что

$$\frac{P_0}{P_0 + \Delta P_1} = \left(\frac{P_0 + \Delta P_2}{P_0 + \Delta P_1} \right)^\gamma. \quad (2.2)$$

Прологарифмируем (2.2) и получим:

$$\gamma = \frac{\lg P_0 - \lg(P_0 + \Delta P_1)}{\lg(P_0 + \Delta P_2) - \lg(P_0 + \Delta P_1)}. \quad (2.3)$$

Величины P_0 , $\Delta P_1 + P_0$, $P_0 + \Delta P_2$ незначительно отличаются друг от друга и в первом приближении логарифмы этих величин можно заменить на их численные значения. В таком случае будем иметь:

$$\gamma = \frac{P_0 - P_0 \Delta P_1}{P_0 + \Delta P_2 - P_0 - \Delta P_1} = \frac{\Delta P_1}{\Delta P_1 - \Delta P_2}, \quad (2.4)$$

т.е. искомая величина равна

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{\Delta P_1}{\Delta P_1 - \Delta P_2}. \quad (2.5)$$

Следовательно, измерив значения ΔP_1 и ΔP_2 , можно рассчитать величину γ . В формулу (2.5) входит отношение давлений, поэтому безразлично, в каких единицах измерять изменения давления. Проще всего разности давлений измерять в миллиметрах водяного столба с помощью манометра, показанного на рисунках (2.1) и (2.2).

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1 Накачать насосом в баллон воздух (процесс 1-2 на рис. 2.3) так, чтобы величина ΔP_1 , показываемая водяным манометром, составляла 20-25 см водяного столба. По возможности быстро закрыть зажимом подводную трубку и подождать не менее двух минут, пока температура внутри баллона станет равной температуре окружающей среды.

4.2 Отсчитать разность уровней манометра ΔP_1 (отсчет производить по нижним границам менисков).

4.3 Нажимом сверху открыть клапан, соединяя на короткое время воздух в баллоне с атмосферой.

4.4 Подождать еще две минуты, пока температура воздуха в баллоне станет постоянной, отсчитать показания манометра ΔP_2 (в мм водяного столба).

4.5 Вычислить γ , занести данные в таблицу 4.1.

4.6 Пункты 4.1-4.5 повторить девять раз.

4.7 Рассчитать $\gamma_{\text{ср}}$, оценить погрешность и записать окончательный результат с указанием его абсолютной и относительной погрешностей.

4.8 Определить число степеней свободы.

При таком методе определения коэффициента Пуассона необходимо выполнение следующих условий:

1) в процессе 3-4 (см. рис. 2.3) клапан баллона должен быть перекрыт в момент, когда давление в баллоне станет равно P_0 (см. рис. 2.2);

2) время, в течение которого давление в баллоне уменьшается от P_1 до P_0 , должно быть достаточно мало, так, чтобы теплообменом с окружающим воздухом можно было пренебречь.

Таблица 4.1 Результаты прямых и косвенных измерений

ΔP_1 , мм	ΔP_2 , мм	$(\Delta P_1 - \Delta P_2)$, мм	γ	Примечание
1				
2				
.				
.				
.				
9				

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1 Какой газ называется идеальным?

5.2 Что такое степени свободы молекул? Как число степеней свободы связано с коэффициентом Пуассона γ ?

5.3 Чему равна теплоемкость идеального газа при адиабатическом процессе?

5.4 В каких единицах измеряются в системе СИ давление, объем, температура, молярные теплоемкости?

5.5 Что такое молярные теплоемкости C_p и C_v ?

- 5.6 Чем молярная теплоемкость отличается от удельной, удельная – от полной?
- 5.7 Что такое адиабатный процесс?
- 5.8 Что такое уравнение Пуассона?
- 5.4 Может ли случиться, что газ получает теплоту, а его внутренняя энергия уменьшается?
- 5.5 Изменяется ли внутренняя энергия идеального газа при изотермическом процессе?
- 5.6 Какое влияние на результат опытов может оказать наличие водяного пара в воздухе, которым наполнен баллон?
- 5.7 Какие из термодинамических параметров, используемых в данной работе, являются функциями состояния?
- 5.8 Какие из термодинамических параметров, используемых в данной работе, являются функциями процесса?
- 5.9 Как изменяется энтропия при адиабатическом процессе? Ее статистический и термодинамический смысл?
- 5.10 Чему равна теплоемкость при изотермическом процессе?
- 5.11 Какие из термодинамических параметров, используемых в данной работе, являются аддитивными?
- 5.12 Какие из термодинамических параметров, используемых в данной работе, являются не аддитивными?
- 5.13 Что такое обратимые процессы?