

Лабораторная работа № 3

Определение отношения теплоёмкостей c_p / c_v для воздуха методом Клемана – Дезорма

Цель работы определение отношения теплоёмкости воздуха при постоянном давлении к теплоёмкости воздуха при постоянном объёме методом Клемана – Дезорма.

Теоретическая часть

Теплоёмкостью тела C называют количество теплоты, необходимое для его нагревания на 1 К

$$C = \frac{\delta Q}{dT}. \quad (1)$$

Величина C зависит от массы тела, его химического состава и процесса, в котором сообщается количество теплоты δQ .

Теплоёмкость единицы массы вещества c называют *удельной теплоёмкостью вещества*

$$c = \frac{C}{m} = \frac{1}{m} \frac{\delta Q}{dT}, \quad (2)$$

где m – масса тела.

Молярной теплоёмкостью C_m называют теплоёмкость одного моля вещества

$$C_m = \frac{C}{\nu} = M \cdot c, \quad (3)$$

где ν – количество вещества, M – молярная масса вещества.

Если нагревать тело при постоянном объёме, то всё тепло, сообщаемое телу извне, полностью идёт на увеличение внутренней энергии. Если нагревать тело при постоянном давлении, то сообщённое тепло идёт не только на увеличение внутренней энергии, но и на работу изобарического расширения. Поэтому теплоёмкость при постоянном давлении C_{mp} должна быть больше, чем теплоёмкость при постоянном объёме C_{mv} . Эти теплоёмкости особенно сильно различаются у газов вследствие относительно большого коэффициента объёмного расширения.

Молярные теплоёмкости C_{mp} и C_{mv} идеального газа связаны уравнением Майера

$$C_{mp} - C_{mv} = R, \quad (4)$$

где R – универсальная газовая постоянная. Для удельных теплоёмкостей c_p и c_v уравнение Майера примет вид

$$c_p - c_v = \frac{R}{M}. \quad (5)$$

Отношение теплоёмкостей $\gamma = c_p / c_v$ принадлежит к числу весьма важных термодинамических величин.

В настоящей работе определение γ производится одним из классических методов, методом Клемана – Дезорма, основанном на исследовании некоторой массы газа, последовательно проходящего через три состояния. Клеман и Дезорм предложили и осуществили этот метод в 1819 году.

Стекло́нный баллон вместимостью несколько литров (рис. 1) наполняется воздухом при атмосферном давлении. С помощью компрессора в баллон дополнительно накачивается небольшая порция воздуха, затем кран K_1 закрывается. Спустя короткое время температура газа в баллоне сравнивается с температурой T_0 в аудитории – состояние (1). После этого жидкостным манометром измеряют давление газа в баллоне

$$p_1 = p_0 + \rho g H, \quad (6)$$

где p_0 – атмосферное давление, ρ – плотность жидкости в манометре, g – ускорение свободного падения, H – разность уровней жидкости в манометре.

Затем на короткое время открывают кран K_2 , газ в баллоне адиабатически расширяется, его давление сравнивается с атмосферным p_0 , при этом часть газа выходит из баллона. Газ в баллоне при расширении совершает работу против давления окружающего воздуха, и вследствие этого его температура понизится до некоторого значения T_1 – состояние (2).

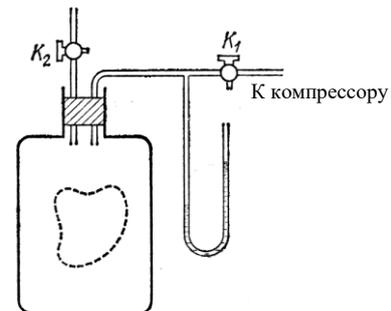


Рис. 1. Схема эксперимента

Затем кран K_2 быстро закрывается, и газ начинает медленно нагреваться в закрытом баллоне, пока его температура не сравняется с температурой T_0 в аудитории – состояние (3). Давление газа в этот момент равно

$$p_2 = p_0 + \rho g h, \quad (7)$$

где h – разность уровней жидкости в манометре.

По измеренным давлениям p_0 , p_1 , p_2 можно вычислить отношение теплоёмкостей γ . Для этого мысленно выделим внутри баллона произвольную порцию газа, ограниченную замкнутой поверхностью. Эта поверхность на рис. 1 изображена пунктиром. Она играет роль «оболочки», в которую заключена рассматриваемая порция газа постоянной массы. В различных процессах газ, заключенный в эту «оболочку», будет расширяться и сжиматься, совершая работу против давления окружающего газа и обмениваясь с ним теплом. Поскольку кинетическая энергия возникающего макроскопического движения невелика, эти процессы могут рассматриваться как квазистатические. В моменты отсчёта давления параметры, характеризующие состояние газа внутри «оболочки», имеют следующие значения

- 1 состояние p_1, T_0, V_1 ;
- 2 состояние p_0, T, V_2 ;
- 3 состояние p_2, T_0, V_2 .

Для адиабатического перехода 1-2 справедливо уравнение Пуассона

$$p_1 V_1^\gamma = p_0 V_2^\gamma. \quad (8)$$

Состояния 1 и 3 соответствуют комнатной температуре T_0 , следовательно, к ним можно применить закон Бойля – Мариотта

$$p_1 V_1 = p_2 V_2. \quad (9)$$

Из уравнений (8) и (9) можно определить γ . Для этого возведём уравнение (9) в степень γ и разделим его на уравнение (8)

$$\frac{(p_1 V_1)^\gamma}{p_1 V_1^\gamma} = \frac{(p_2 V_2)^\gamma}{p_0 V_2^\gamma} \quad \text{или} \quad \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^\gamma = \frac{p_1}{p_0}. \quad (10)$$

Логарифмируя (10), получим с учётом (6) и (7)

$$\gamma = \frac{\ln p_1 - \ln p_0}{\ln p_1 - \ln p_2} = \frac{\ln(p_0 + \rho g H) - \ln p_0}{\ln(p_0 + \rho g H) - \ln(p_0 + \rho g h)}. \quad (11)$$

Так как $\rho g h$ и $\rho g H$ значительно меньше p_0 , логарифмы можно разложить в ряд, ограничиваясь членами 1-го порядка малости

$$\ln(p_0 + \rho g H) \approx \ln p_0 + \frac{\rho g H}{p_0} \quad (12)$$

и

$$\ln(p_0 + \rho gh) \approx \ln p_0 + \frac{\rho gh}{p_0}. \quad (13)$$

Подставив выражения (12) и (13) в (11), получим расчётную формулу для γ

$$\gamma = \frac{H}{H - h}. \quad (14)$$

Следует отметить, что практически невозможно добиться того, чтобы длительность открывания баллона в точности совпала бы со временем адиабатического расширения воздуха. Если перекрыть баллон раньше, чем давление упадёт до атмосферного, получим завышенное значение h , обозначим его h' . Наоборот, при запаздывании получается заниженное значение h , обозначим его h'' , эта величина тем сильнее отличается от h , чем больше время запаздывания τ . Как показывает опыт, между h'' , h и τ выполняется соотношение

$$\ln h'' = \ln h - A\tau, \quad (15)$$

где A – константа.

На рис. 2. представлен возможный график зависимости $\ln h''$ от различных времен запаздывания τ , из которого видно, что путем экстраполяции можно найти $\ln h$ и, следовательно, h .

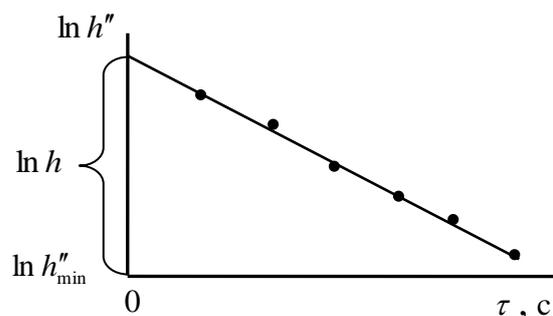


Рис. 2. Линейная зависимость

Экспериментальная часть

Описание установки

Установка для определения c_p/c_v изображена на рис. 3. Установка состоит из стеклянного баллона (1), в который накачивается воздух компрессором (2) через ловушку (3) и осушитель (4) до некоторого давления, превышающего атмосферное. Накачивание воздуха в баллон производится при закрытом кране (5) и открытом кране (6). По окончании накачивания кран (6) должен быть закрыт. Разность давлений воздуха в баллоне и окружающей среде измеряется манометром (7). Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 4.

Выполнение работы

1. Закрыть кран (5) и открыть кран (6). Включить компрессор. Когда разность уровней жидкости в коленах манометра достигнет

значения $H_0 = 150 \div 300$ мм (точное значение H_0 задает преподаватель), закрыть кран (6), выключить компрессор. Выждать 2–3 мин, чтобы уровни масла в манометре перестали меняться и сделать отсчёт разности уровней H с точностью до миллиметра. Данные записать в таблицу.

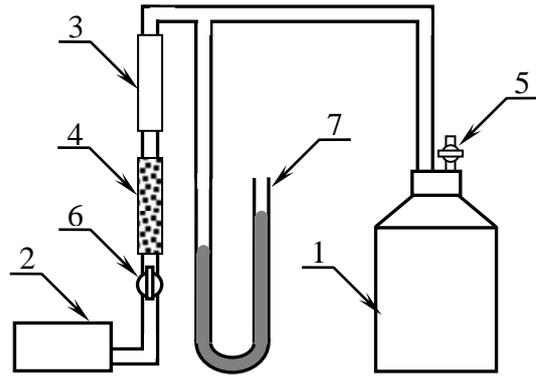


Рис. 3. Схема установки

- Быстро открыть кран (5) и через $\tau = 5$ с кран (5) быстро закрыть (время засесть секундомером). Выждав 2–3 мин, пока уровни масла в манометре перестанут меняться, произвести отсчёт разности уровней h'' с точностью до миллиметра. Данные записать в таблицу.

№	τ , с	H , мм	h'' , мм	$\ln h''$
1	5			
2	10			
3	15			
4	20			
5	25			
6	30			

- Для заданного значения H_0 повторить опыт для пяти различных времён запаздывания τ (см. таблицу выше) согласно пп. 1-2. **Проводя измерения для различных времён запаздывания τ , следует строго следить, чтобы начальная разность давлений H_0 была во всех опытах одинакова.**
- Построить график зависимости $\ln h'' = f(\tau)$. Точки должны укладываться на прямую линию (аналогично рис. 2).
- Определить по графику величину $\ln h$. Вычислить среднее значение $\langle H \rangle$, рассчитать погрешность $\Delta \langle H \rangle$.
- По формуле (14) вычислить γ . Вычислить абсолютную и относительную погрешности определения γ . Полученный результат сравнить с теоретическим значением для двухатомного газа, полученным на основе молекулярно-кинетической теории.

Контрольные вопросы

1. Что такое теплоёмкость?
2. Как связаны между собой величины C_{mp} и C_{mV} ? Какая из этих величин больше и почему?
3. В чём заключается метод Клемана – Дезорма?
Получите расчётную формулу.
4. Почему при резком открывании крана (5) на короткое время считаем, что газ расширяется адиабатически?
5. Чему равно изменение внутренней энергии газа для любого процесса?
6. Как вычислить молярные теплоёмкости и величину γ через число степеней свободы i молекулы газа?

Литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики: Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. – 5-е изд. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 544 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3 т. Том 1. Механика. Молекулярная физика. - 13-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2017. — 436 с.
3. Кикоин И.К., Кикоин А.К. Молекулярная физика.– СПб. Лань, 2008. — 480 с.
4. Физические величины Справочник / Под ред. И. К. Кикоина.– М. Атомиздат, 1976.



Рис. 4. Экспериментальная установка

Лабораторная работа № 3. Лист отчёта
Определение отношения теплоёмкостей c_p / c_v для воздуха

методом Клемана – Дезорма

Выполнил студент _____
 Факультет _____ курс _____ группа _____
 Проверил _____
 Показания сняты _____
 Зачтено _____

Погрешности измерительных приборов $\alpha =$ _____

Измерительный прибор	ω – цена деления	$\Delta_{\text{окр}}$ – округления	$\Delta_{\text{пр}}^{\text{max}}$ – приборная	$\Delta_{\text{суб}}^{\text{max}}$ – субъективная	Единицы измерения
Жидкостный манометр					
Секундомер					

Результаты измерений

№	τ , с	H , мм	h'' , мм	$\ln h''$
1	5			
2	10			
3	15			
4	20			
5	25			
6	30			

Формулы для расчёта косвенных измерений

Ответ:

Величина	Значение		Абсолютная погрешность	Единицы измерения	Относительная погрешность
$\gamma =$		\pm			
Табличное значение					
$\gamma_{\text{т}} =$		\pm			

Интервалы сравнений