

Лабораторная работа № 1

Определение термического коэффициента давления газа

Цель работы: определение термического коэффициента давления одинакового для всех идеальных газов; знакомство с жидкостным лабораторным термостатом.

Теоретическая часть

Изменение температуры газа при постоянном объёме приводит к изменению его давления, характеризуемого термическим коэффициентом давления, который определяется как относительное¹ изменение давления газа при изменении температуры на 1 Кельвин или градус Цельсия при постоянном объёме

$$\beta = \frac{1}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V, \quad (1)$$

где ∂p – бесконечно малое изменение давления газа, вызванное изменением температуры на величину ∂T , p – первоначальное давление, индекс V у частной производной показывает, что она берётся при $V = \text{const}$.

Для идеального газа этот коэффициент можно определить, используя уравнение Менделеева – Клапейрона

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (2)$$

Дифференцируя его по T , при постоянном V , получим

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V = \frac{mR}{MV}. \quad (3)$$

Из уравнений (1), (2), (3) следует

$$\beta = \frac{MV}{mRT} \frac{mR}{MV} = \frac{1}{T}. \quad (4)$$

Таким образом, термический коэффициент давления идеального газа обратно пропорционален абсолютной температуре. В частности, при $T = 273,15 \text{ К}$ ($0 \text{ }^\circ\text{C}$) $\beta = \beta_0 = \frac{1}{273,15} \text{ К}^{-1} = 0,0036610 \text{ К}^{-1}$.

Для экспериментального определения термического коэффициента давления воздуха воспользуемся законом Шарля

¹Относительным изменением какой-либо величины называется отношение изменения этой величины к её первоначальному значению.

$$p = p_0(1 + \beta t), \quad (5)$$

где t – температура газа по Цельсию, p – давление данной массы газа при температуре t , p_0 – давление данной массы газа при 0°C .

Из формулы (5) можно выразить термический коэффициент давления β , но тогда для его расчёта необходимо исследовать данную массу газа при 0°C , что технически осуществить сложно. Проще нагреть газ до температуры выше комнатной, поэтому проведём исследование постоянной массы газа при двух различных температурах, одна из которых близка к комнатной температуре, а другая выше. Тогда

$$p_1 = p_0(1 + \beta t_1) \quad (6)$$

и

$$p_2 = p_0(1 + \beta t_2). \quad (7)$$

Решая систему уравнений (6,7), получим расчётную формулу

$$\beta = \frac{p_2 - p_1}{p_1 t_2 - p_2 t_1}. \quad (8)$$

Экспериментальная часть

Описание установки

Прибор для определения термического коэффициента давления воздуха изображен на рис. 1. Он состоит из металлического баллона (Б), заполненного воздухом при пониженном давлении, который помещён в бак (1) лабораторного термостата, заполненный минеральным маслом. Баллон (Б) соединён с вакуумметром (В) резиновой и металлической трубками.

Жидкостный лабораторный термостат (греч. *therme* – температура и *statos* – постоянный) СЖМЛ –

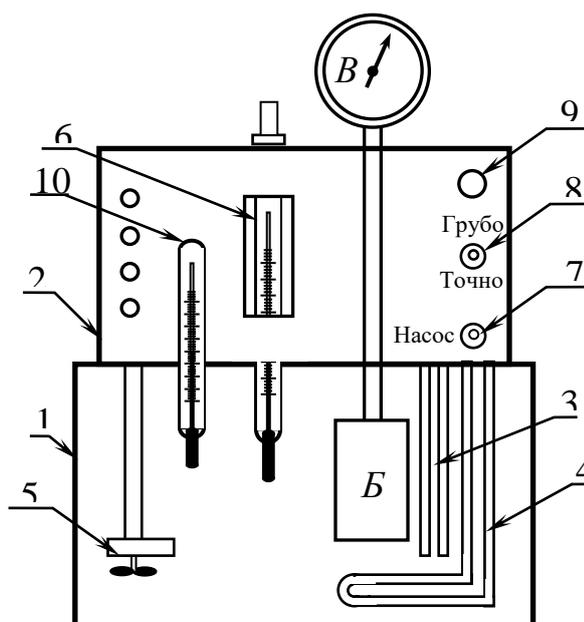


Рис. 1. Схема установки

19/2, используемый в установке, предназначен для поддержания заданной температуры в аппаратах различного типа в диапазоне от 30 °С до 250 °С. Термостат (см. рис. 1) состоит из бака (1) и блока управления (2).

Блок управления предназначен для установки и автоматического поддержания температуры в баке термостата, а также для подачи теплоносителя во внешние термостатируемые объекты. В блоке управления размещены электронный регулятор температуры, нагреватели (3), охладитель (4), электродвигатель, приводящий в действие насос и мешалку (5), контактный термометр (6).

Тумблер «Насос» (7) предназначен для включения электронного блока и электродвигателя насоса и мешалки.

Термостатная жидкость (теплоноситель) в баке нагревается двумя нагревателями (3) по 1000 Вт каждый. Включение нагревателей и подбор мощности нагрева осуществляется тумблером «Режим» (8). В положении «Точно» мощность нагрева в два раза меньше, чем в режиме «Грубо». О работе нагревателей можно судить по индикаторной лампе (9), которая горит, когда через нагреватели идёт ток.

Охладитель (4) представляет собой металлическую трубку, свёрнутую в виде спирали и помещённую в термостатную жидкость. Термостатная жидкость охлаждается при пропускании через охладитель водопроводной воды. Охладитель используется, если необходимо поддерживать температуру, близкую или ниже комнатной, а также, если необходимо перейти от заданной более высокой температуры к более низкой.

Контактный термометр (Рис. 2) служит датчиком необходимой температуры. Он представляет собой ртутный термометр, в капилляр (1) которого введена тонкая металлическая игла (2).

Верхний конец иглы закреплен в гайке-установке (3), способной перемещаться вдоль длинного винта (4). Винт можно вращать с помощью магнита (5), который надевается на головку термометра. Электровыводы (6), (7) от столбика ртути и иглы подключаются к электронному блоку управления. Вращением магнита нижний конец иглы (2) устанавливается против требуемой рабочей температуры, ориентируясь по верхней вспомогательной шкале термометра (8). При повышении температуры до заданной столбик ртути в капилляре касается нижнего конца иглы, цепь замыкается, и блок управления отключает нагрев. При понижении температуры цепь размыкается, и

блок управления включает нагреватели. Таким образом, в термостате поддерживается постоянная температура, близкая к заданной.

Контрольный термометр (10) (Рис. 1) предназначен для измерения температуры термостатной жидкости.

Вакуумметр (В) (Рис. 1) измеряет разрежение в баллоне (Б). Следовательно, чтобы найти давление в баллоне, надо из атмосферного давления вычесть показание вакуумметра. Шкала вакуумметра имеет 100 делений и рассчитана на 1 кгс/см^2 (кгс – килограмм-сила; $1 \text{ кгс} = 9,80665 \text{ Н}$). $1 \text{ кгс/см}^2 = 1 \text{ ат} = 736 \text{ мм рт. ст.}$ (ат – атмосфера техническая), следовательно, цена деления шкалы $C = 7,36 \text{ мм рт. ст.}$, и тогда $p = p_{\text{ат}} - Cn$, где n – отсчёт по вакуумметру в делениях шкалы, $p_{\text{ат}}$ – атмосферное давление в мм рт.ст. *Например, показание барометра $p_{\text{ат}} = 750 \text{ мм рт. ст.}$, а стрелка вакуумметра указывает на деление $n = 27,5$. Тогда $p = 750 - 7,36 \cdot 27,5 = 547,6 \text{ мм рт. ст.}$*

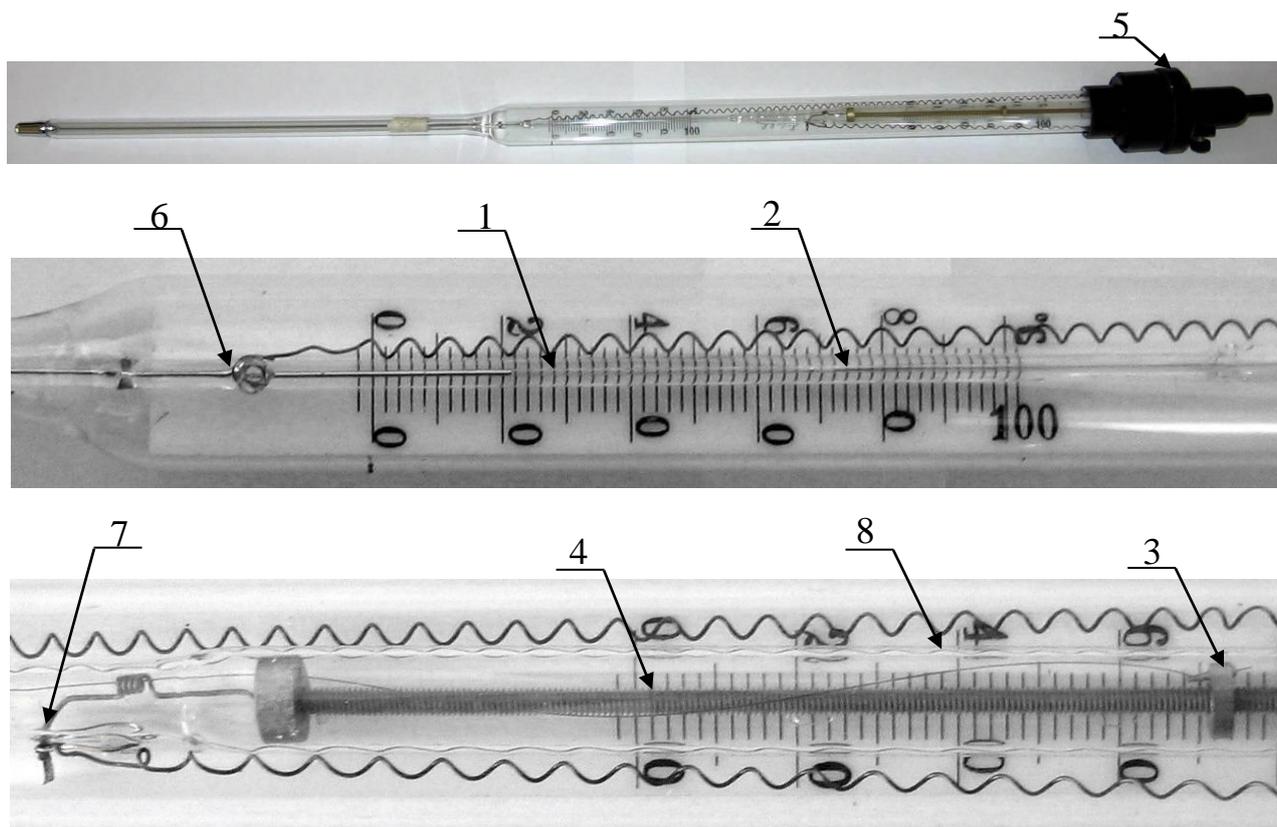


Рис. 2. Контактный термометр

Выполнение работы

1. Определить температуру в лаборатории (t_k) и атмосферное давление (p_{atm}) используя приборы в лаборатории (Рис. 3). Результаты записать.
2. Убедившись в том, что тумблер «Режим» находится в нейтральном положении, включить двигатель мешалки тумблером «Насос». (см. общий вид установки рис. 4). Через 1 мин определить температуру газа в баллоне по контрольному термометру. При этом температура газа в баллоне **не должна превышать** температуру в лаборатории **более чем на 10 °С**. Если это не так, то необходимо подключить охладитель термостата к водопроводной сети и понизить температуру в термостате до достижения выше обозначенного условия.
3. Записать показания контрольного термометра (t_1) и вакуумметра (n_1).
4. С помощью контактного термометра установить температуру (по нижнему краю гайки-установки) $t_2 \approx 50 \div 65$ °С (точное значение задаёт преподаватель). Тумблер «Режим» перевести в положение



Рис. 3. Приборы для определения комнатной температуры и атмосферного давления

«Грубо», при этом включатся нагреватели термостата и загорится контрольная лампа.

5. Следить за работой термостата в режиме разогрева по сигнальной лампе и показаниям термометра и вакуумметра, при этом температура будет повышаться, а показания вакуумметра уменьшаться. При

достижении температуры на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже заданной, тумблер «Режим» перевести в положение «Точно» – режим пониженной мощности. Далее

продолжить следить за работой термостата и в момент, когда контрольная лампа погаснет, необходимо включить секундомер и засечь 10 мин – время, необходимое для прогрева газа в баллоне. По истечении этого времени записать температуру (t_2) по контрольному термометру и показания вакуумметра (n_2).

6. Тумблер «Режим» перевести в нейтральное положение, а тумблером «Насос» выключить двигатель мешалки.
7. Вычислить β по формуле (8), абсолютную ($\Delta\beta$) и относительную (ε_β) погрешности. Сравнить β с табличным значением.

Отличие полученного результата от табличного объясняется систематической ошибкой, возникающей из-за того, что воздух



Рис. 4. Экспериментальная установка

внутри соединительных трубок и вакуумметра остаётся при комнатной температуре. Поэтому давление в баллоне оказывается ниже, чем при полном нагреве всей установки из-за перетекания части воздуха Δm из баллона в вакуумметр.

8. Ввести поправку, вычислив давление p'_2 , которое установилось бы в баллоне при полном нагреве установки, по формуле

$$p'_2 = \frac{p_1 p_2}{p_1 - \frac{V_B}{V_B} (p_2 - p_1)}, \quad (9)$$

где объём вакуумметра $V_B = (100 \pm 5) \text{ см}^3$, объём баллона $V_B = (1600 \pm 50) \text{ см}^3$.

Формулу (9) можно найти из следующей системы уравнений

$$\begin{cases} p_1 V_B = \frac{m_B}{M} RT_1 \\ p_2 V_B = \frac{m_B + \Delta m}{M} RT_1 \end{cases} \Rightarrow \Delta m = m_B \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right), \quad (10)$$

$$\begin{cases} p_1 V_B = \frac{m_B}{M} RT_1 \\ p'_2 V_B = \frac{m_B}{M} RT_2 \end{cases} \Rightarrow \Delta m = m_B \left(1 - \frac{p_2}{p'_2} \right). \quad (11)$$

Приравнивая правые части (10) и (11), получим (9), учитывая, что $m_B/m_B = V_B/V_B$. При этом мы не делаем поправку на тепловое расширение баллона.

9. Вычислить β' , подставив в формулу (8) давление p'_2 . Сравнить полученный результат с табличным.

Контрольные вопросы

1. Каков физический смысл термического коэффициента давления?
2. Какими законами описываются различные изопроцессы в идеальном газе?
3. Каково устройство и принцип действия контактного термометра?
4. Каково устройство, принцип действия и назначение жидкостного лабораторного термостата?

Литература

1. Кикоин И.К., Кикоин А.К. Молекулярная физика.– СПб. Лань, 2008. — 480 с.
2. Трофимова, Т. И. Курс физики: Учеб. пособие для инженерно-технических специальностей вузов / Т. И. Трофимова.– 21-е изд., стер.– М.: Академия, 2015.
3. Трофимова, Т. И. Физика: Учеб. по техническим направлениям подготовки. Квалификация «бакалавр» / Т. И. Трофимова.– 2-е изд.– М.: Академия, 2013.
4. Физические величины Справочник / Под ред. И. К. Кикоина.– М. Атомиздат, 1976.

Лабораторная работа № 1. Лист отчёта
Определение термического коэффициента давления газа

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

Погрешности измерительных приборов $\alpha =$ _____

Измерительный прибор	ω – цена деления	$\Delta_{\text{окр}}$ – округления	$\Delta_{\text{пр}}$ – приборная	$\Delta_{\text{суб}}$ – субъективная	Единицы измерения
Комнатный термометр					
Барометр					
Контрольный термометр					
Вакуумметр					

Результаты измерений

Величина	Значение		Абсолютная погрешность	Единицы измерения	Относительная погрешность
$t_k =$		\pm			
$p_{\text{атм}} =$		\pm			
$t_1 =$		\pm			
$n_1 =$		\pm			
$t_2 =$		\pm			
$n_2 =$		\pm			

Формулы для расчёта косвенных измерений

Ответ:

Величина	Значение		Абсолютная погрешность	Единицы измерения	Относительная погрешность
$\beta =$		\pm			
$\beta' =$		\pm			
Табличное значение					
$\beta_{\text{т}} =$		\pm			

Интервалы сравнений