

Лабораторная работа В4.04

ЗАКОН ШАРЛЯ

Цель работы

Исследование зависимости давления воздуха от температуры в замкнутом объеме.

Задачи

1. Исследовать зависимость давления воздуха от температуры при его нагреве в закрытом сосуде.
2. Определить значение относительного температурного коэффициента давления.
3. Оценить значение температуры, соответствующей абсолютному нулю температуры по шкале Цельсия.

Введение

Состояние некоторой массы газа определяется значениями трёх параметров: давления p , объема V и температуры t° . Соотношение, устанавливающее связь между параметрами, – уравнение состояния – в общем виде задаётся выражением

$$f(p, V, t^\circ) = 0.$$

При исследовании этой зависимости, в случае, когда один из параметров остаётся постоянным, были открыты закономерности, названные газовыми законами.

В 1787 г. Жак Шарль установил, что давление любых достаточно разреженных газов при неизменном объёме линейно зависит от температуры:

$$p = p_0(1 + \alpha t^\circ), \quad (1)$$

где t° – температура по Цельсию, p_0 – давление при $t=0^\circ\text{C}$ и α – постоянный коэффициент (термический коэффициент давления), численное значение которого

приблизительно равно $\alpha \approx 1/273^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Соотношение (1) выполнялось для любых количеств любого газа независимо от его химической природы, в том числе для воздуха при давлениях, которые не очень сильно превышают атмосферное. Процесс, протекающий при постоянном объеме, называется *изохорным*. На диаграмме p, t° (рис.1) этот процесс изображается прямой линией (изохорой), пересекающей ось температуры в точке

$$t_0 = -1 / \alpha = -273,15^{\circ}\text{C}.$$

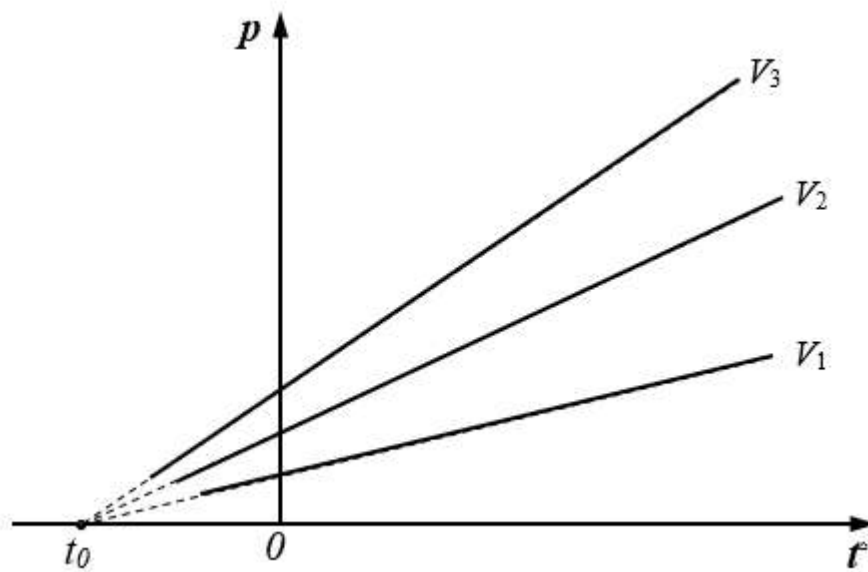


Рис. 1. Зависимости давления газа от температуры по шкале Цельсия при разных объемах газа

Если перенести ноль температурной шкалы в эту точку, то происходит переход от шкалы температур по Цельсию к другой температурной шкале, которая называется абсолютной (или шкалой Кельвина). Между абсолютной температурой (T) и температурой по Цельсию t° имеется следующее соотношение

$$T = t^{\circ} + \frac{1}{\alpha} = t^{\circ} + 273,15.$$

Температура, равная 0 К, называется абсолютным нулем, по шкале Цельсия ему соответствует $-273,15^{\circ}\text{C}$.

Переходя в уравнении (2) к абсолютной температуре, получим

$$p = p_0 \alpha T,$$

или

$$\frac{p}{T} = \text{const} . \quad (2)$$

Соотношения (1) и (2) – есть аналитическое выражение закона Шарля (в иностранной и частично русскоязычной литературе именуемого законом Гей-Люссака), проверке которого посвящена данная лабораторная работа.

Обобщением экспериментальных газовых законов стало уравнение состояния идеального газа:

$$pV = nRT, \quad (3)$$

где n – количество вещества газа, $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ – универсальная газовая постоянная.

Экспериментальная установка

Общий вид экспериментальной установки показан на рисунке 2.

Полая металлическая сфера 1, заполненная воздухом, помещена в цилиндрический сосуд 2 с водой. Нагрев воды в сосуде осуществляется с помощью нагревателя 3 с регулируемой скоростью нагрева. Электронный термометр 4, помещённый внутри цилиндрического сосуда, измеряет температуру воды в нем, которая в условиях эксперимента принимается равной температуре воздуха в сфере.

Давление воздуха в сфере определяется с помощью манометра 5 в гектопаскалях ($1 \text{ гПа} = 100 \text{ Па}$).

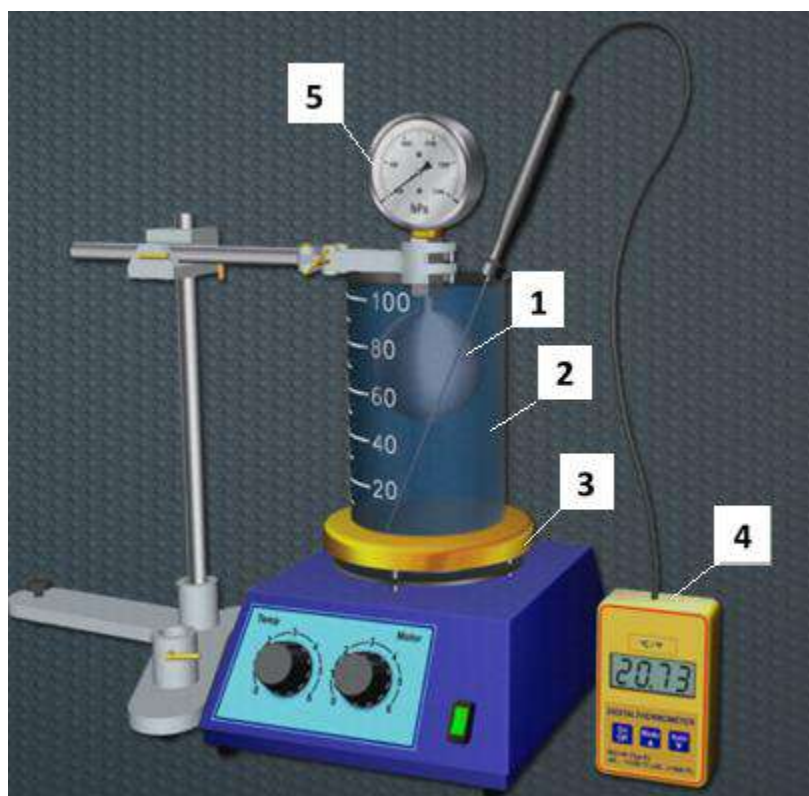


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки. 1 – сферический сосуд с воздухом; 2 – цилиндрический сосуд с водой; 3 – нагреватель; 4 – электронный термометр; 5 – манометр

Порядок проведения эксперимента

1. Запустите программу виртуальной лабораторной работы. Нажмите кнопку «Начать эксперимент».
2. На панели параметров эксперимента (рис. 3) установите предложенные преподавателем исходные данные: скорость нагрева λ , количество вещества n и диаметр сферы D . Запишите эти значения в таблицу 1.
3. Определите значения начального давления p_1 , соответствующего начальной температуре $t_1=20^\circ\text{C}$.

4. Запустите симуляцию. После нажатия кнопки запуска, сразу же необходимо начать измерения: по манометру определите значения давления p через каждые 5°C нагрева (при повышении температуры на каждые 5°C раздаётся звуковой сигнал). При измерениях можно воспользоваться кнопкой паузы симуляции. Измеренные таким образом 15–20 значений занесите в таблицу 1.

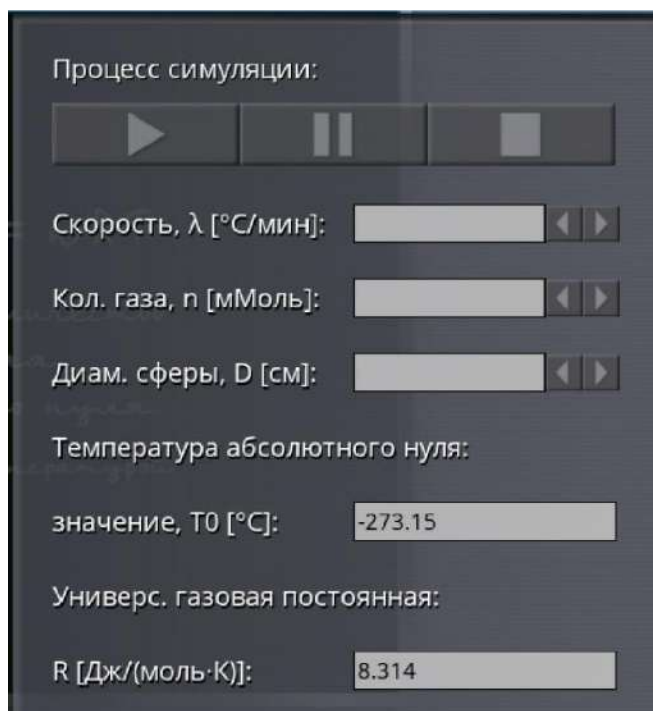


Рис. 3. Панель параметров эксперимента

Таблица 1. Зависимость давления воздуха от температуры

$\lambda =$ $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, $n =$ моль, $D =$ см		
№	$t, ^{\circ}\text{C}$	$p, \text{гПа}$
1	20	
2	25	
3	30	
...		

Обработка результатов

- По данным таблицы 1 постройте график зависимости давления воздуха в сферическом сосуде от температуры $p(t^\circ)$.
- Продолжите график до пересечения с осью давлений, точка пересечения – p_0 – давление при $t=0^\circ\text{C}$.
- Для зависимости $p(t^\circ)$ методом парных точек вычислите угловой коэффициент β :

$$\beta = \frac{\Delta p}{\Delta t^\circ}.$$

Результаты вычислений занесите в таблицу 2.

- Вычислите среднее значение углового коэффициента $\langle\beta\rangle$ и его случайную погрешность $\Delta\beta$.

Таблица 2. Вычисление углового коэффициента β зависимости $p(t^\circ)$

Пары точек $i-j$	$\Delta p_{ij},$ гПа	$\Delta t_{ij},$ °C	$\beta_{ij},$ гПа/°C	$\beta_{ij}-\langle\beta\rangle,$ гПа/°C	$(\beta_{ij}-\langle\beta\rangle)^2,$ (гПа/°C) ²
...					
			$\langle\beta\rangle =$		$\sum_{ij} (\beta_{ij} - \langle\beta\rangle)^2 =$

- Заполните таблицу 3, вычислив p_0 по формуле

$$p_0 = p - \langle\beta\rangle t^\circ.$$

Вычислите его среднее значение и погрешность.

Таблица 3. Вычисление p_0

	$t^{\circ}\text{C}$	p , гПа	p_0 , гПа	$p_0 - \langle p_0 \rangle$, гПа	$(p_0 - \langle p_0 \rangle)^2$, (гПа) ²
1					
2					
...					
			$\langle p_0 \rangle =$		$\sum (p_0 - \langle p_0 \rangle)^2 =$

6. Определите термический коэффициент давления

$$\alpha = \frac{\langle \beta \rangle}{p_0}.$$

7. Вычислите относительную и абсолютную погрешность термического коэффициент давления:

$$\delta\alpha = \sqrt{\delta\beta^2 + \delta p_0^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\beta}{\langle\beta\rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p_0}{p_0}\right)^2},$$

$$\Delta\alpha = \alpha \delta\alpha.$$

8. Запишите окончательный результат для термического коэффициента давления.

9. Вычислите значение $-1/\alpha$, которое соответствует абсолютному нулю температур по шкале Цельсия, и его погрешность. Сравните полученную величину с теоретическим значением.

Контрольные вопросы

1. Какие законы идеального газа вы знаете?
2. Как зависит давление идеального газа от температуры при фиксированном объеме?
3. Что такое термический коэффициент давления?

4. На рисунке 1 сравните объёмы газа V_1 , V_2 и V_3 , которым соответствуют изохоры.

Литература

1. Детлаф А. А. Курс физики: учебное пособие для вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. 9-е изд., стер. М.: Академия, 2014. 719с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики: учебное пособие: в 3 томах / И. В. Савельев. 21-е изд., стер. СПб.: Лань, 2026. Том 1: Механика. Молекулярная физика. 448 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики: учебное пособие для физических специальностей вузов: [в 5 томах] / Д. В. Сивухин. Изд. 6-е, стер. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. Т. 2: Термодинамика и молекулярная физика. 544 с.
4. Физика. Практическая обработка экспериментальных данных: метод. указания / сост.: Б. Д. Агапьев, В. В. Козловский. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 61 с.