

## Отчет по лабораторной работе 2.1.6

### «Эффект Джоуля-Томсона»

**Цель работы:** 1) определение изменения температуры углекислого газа при протекании через малопроницаемую перегородку при разных начальных значениях давления и температуры; 2) вычисление по результатам опытов коэффициентов Ван-дер-Ваальса « $a$ » и « $b$ ».

**В работе используются:** трубка с пористой перегородкой; труба Дьюара; термостат; термометры; дифференциальная термопара; микровольтметр; балластный баллон; манометр.

#### Теоретические сведения:

Эффектом Джоуля-Томсона называется изменение температуры газа, медленно протекающего из области высокого в область низкого давления в условиях хорошей тепловой изоляции. В разреженных газах, которые приближаются по своим свойствам к идеальному газу, при таком течении температура газа не меняется. Эффект Джоуля-Томсона демонстрирует отличие исследуемого газа от идеального.

В работе исследуется изменение температуры углекислого газа при медленном его течении по трубке с пористой перегородкой (рис.1). Трубка 1 хорошо изолирована. Газ из области повышенного давления  $P_1$  проходит через множество узких и длинных каналов пористой перегородки 2 в область с атмосферным давлением  $P_2$ . Перепад давления  $\Delta P = P_1 - P_2$  из-за большого сопротивления каналов может быть заметным даже при малой скорости течения газа в трубке. Величина эффекта Джоуля-Томсона определяется по разности температуры газа до и после перегородки.

Сделаем несколько замечаний. Прежде всего отметим, что в процессе Джоуля-Томсона газ испытывает в пористой перегородке существенное трение, приводящее к ее нагреву. Потери энергии на нагрев трубки в начале процесса могут быть очень существенными и сильно искажают ход явления. После того как температура трубки установится и газ станет уносить

с собой все выделенное им в пробке тепло, формула  $A_1 - A_2 = (U_2 + \frac{\mu v_2^2}{2}) - (U_1 + \frac{\mu v_1^2}{2})$ , где

$A_1$  - работа, которую нужно выполнить над газом, чтобы ввести в трубку объем  $V_1$ ,  $A_2$  - работа, совершенная газом при прохождении сечения II,  $U_1$ ,  $U_2$  - отнесенные к молю внутренние энергии газов в сечении I и II соответственно, становится точной, если теплоизоляция трубки достаточно хороша и не происходит утечек тепла наружу через ее стенки.

В данной лабораторной работе исследуется коэффициент дифференциального эффекта Джоуля-Томсона для углекислого газа. По экспериментальным результатам оценивается коэффициент теплового расширения, постоянные в уравнении Ван-дер-Ваальса и температура инверсии углекислого газа. Начальная температура  $T_1$  задается термостатом. Измерения проводятся при трех температурах: комнатной, 50 °С и 80 °С.

**Экспериментальная установка.** Схема установки для исследования эффекта Джоуля-Томсона в углекислом газе представлена на рисунке 1.

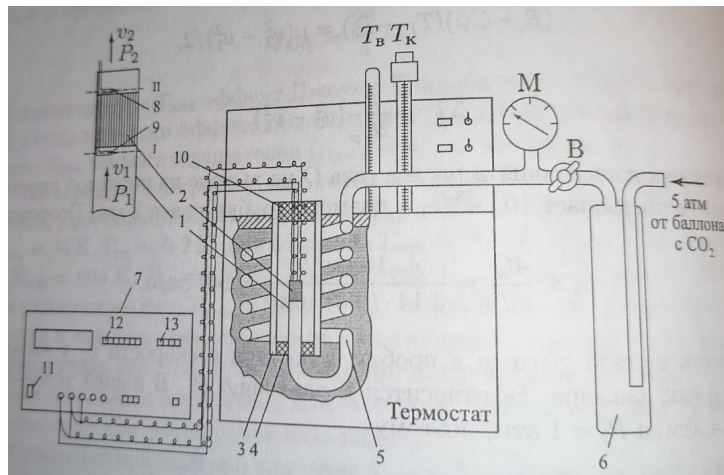


Рисунок 1: Схема установки для изучения эффекта Джоуля-Томсона

Элементы:

- 1 — трубка
- 2 — пористая перегородка
- 3 — труба Дьюара
- 4 — кольцо, уплотняющее трубу Дьюара 3
- 5 — змеевик
- 6 — балластный баллон
- 7 — цифровой вольтметр
- 8 и 9 — спаи
- 10 — пробка из пенопласта
- 11 — выключатель «Сеть»
- 12 — кнопка «АВП» (автоматический выбор предела)
- 13 — кнопка «U=» (род работы)

### Ход работы

1. Перед началом работы убеждаемся в том, что термостат залит водой, а все электрические приборы заземлены, так как установка весьма чувствительна к электрическим и тепловым помехам.
2. Установив на контактном термометре  $T_k$  температуру регулирования, близкую к комнатной, включим термостат.
3. На вольтметре поставим в положение «Вкл» выключатель «Сеть». Убедимся, что на вольтметре нажаты кнопки «АВП» и «U=». Запишем знак и величину показаний вольтметра при  $\Delta P = 0$  (они могут быть ненулевыми из-за различных паразитных ЭДС). Используем эту величину для корректировки показаний вольтметра и в дальнейших измерениях:

$$\varepsilon = U(P) - U(0)$$

Откроем регулирующий вентиль В настолько, чтобы избыточное давление составило  $\Delta P \approx 4 \text{ атм}$

4. Через 10-15 минут после подачи давления, когда полностью затухнут переходные процессы, запишем показания манометра и вольтметра.

5. При помощи вентиля В установим давление на 0,3-0,5 атм меньше первоначального. Через 5 минут, когда установятся давление и разность температур, вновь запишем показания манометра и вольтметра.

6. Проведем измерения для 6 значений давления при комнатной температуре 20,05 °C (см. Таблицу 1):

Таблица 1

	Погрешность	1	2	3	4	5	6
$\Delta P$ , атм	0,05	4,00	3,60	3,15	2,75	2,25	1,75
$U(P)-U(0)$ , мкВ	1	138	122	102	88	69	54
$\Delta T$ , °C	0,1	3,4	3,0	2,5	2,2	1,7	1,3

7. Отложив полученные точки на графике  $\Delta T(\Delta P)$ , по наклону графика определим коэффициент Джоуля-Томсона для выбранной нами температуры (см. рис. 2).

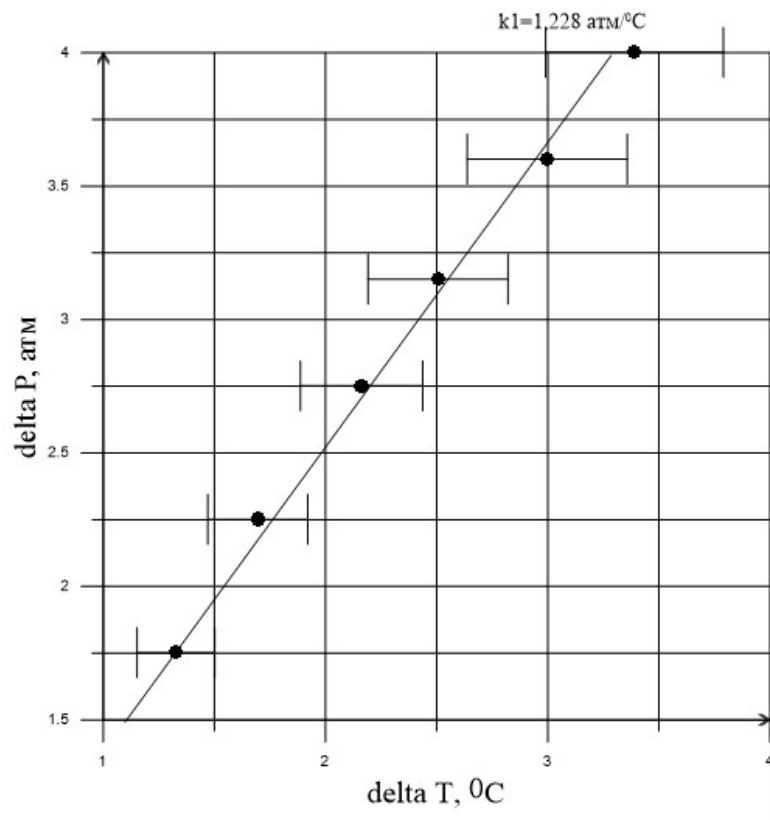


Рисунок 2

Используя метод наименьших квадратов, получаем:

$$k_1 = \frac{\langle \Delta P \Delta T \rangle}{\langle \Delta T^2 \rangle} = \frac{7,39}{6,01} \approx 1,228 \frac{\text{атм}}{^\circ\text{C}}$$

$$\sigma_{k_1} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_P}{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{\Delta T}\right)^2} = \sqrt{0,000343715 + 0,002230378} = 0,050735521 \approx 0,051 \frac{\text{атм}}{^\circ\text{C}}$$

$$k_1 = (1,228 \pm 0,051) \frac{\text{атм}}{^{\circ}\text{C}}$$

8. Окончив измерения при комнатной температуре, закроем регулирующий вентиль В и установим на контактном термометре температуру 35,05 °С.

9. Когда температура установится и установка войдет в стационарный режим, повторим измерения, как указано в пунктах 3-7 (см. Таблицу 2). Учтем, что чувствительность термопары медь-константан зависит от температуры:

Температура, °С	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-10
мкВ/°С	38,9	39,8	40,7	41,6	42,5	43,3	44,1	44,9	45,6	46,4

Таблица 2

	Погрешность	1	2	3	4	5	6
$\Delta P$ , атм	0,05	4,00	3,05	3,00	2,50	2,10	1,60
$U(P) - U(0)$ , мкВ	1	166	148	134	118	105	88
$\Delta T$ , °С	0,1	4,0	3,6	3,2	2,8	2,5	2,1

Отложив полученные точки на графике  $\Delta T(\Delta P)$ , по наклону графика определим коэффициент Джоуля-Томсона для выбранной нами температуры (см. рис. 3)

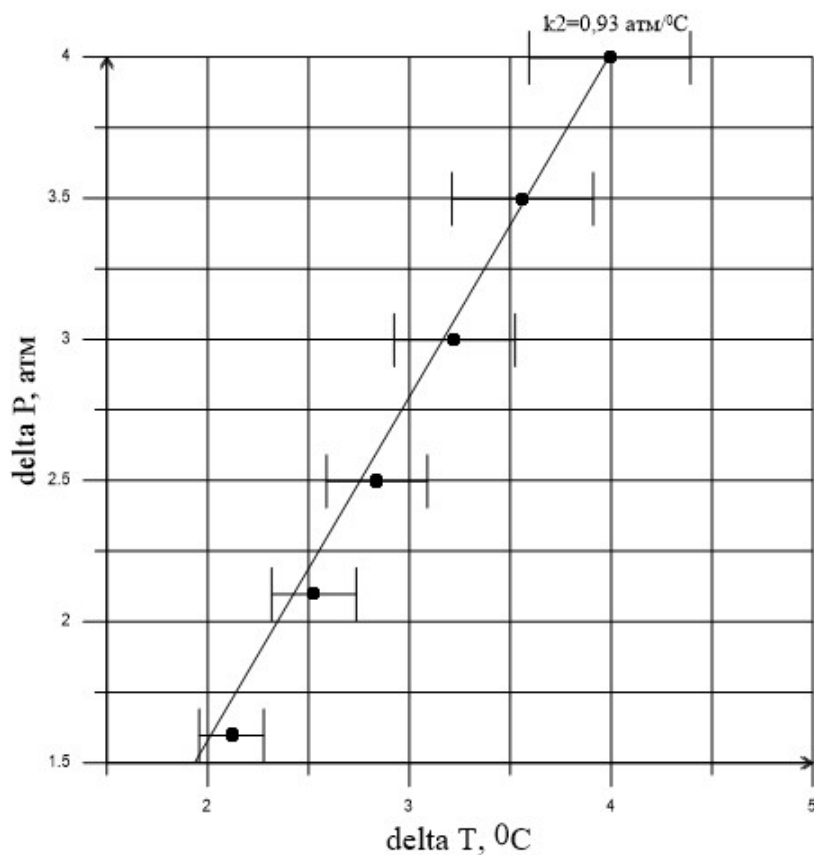


Рисунок 3

Используя метод наименьших квадратов, получаем:

$$k_2 = \frac{\langle \Delta P \Delta T \rangle}{\langle \Delta T^2 \rangle} = \frac{8,98}{9,64} \approx 0,93 \frac{\text{атм}}{^\circ\text{C}}$$

$$\sigma_{k_2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_P}{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{\Delta T}\right)^2} = \sqrt{0,000390141 + 0,001182891} = 0,039661472 \approx 0,04 \frac{\text{атм}}{^\circ\text{C}}$$

$$k_2 = (0,93 \pm 0,04) \frac{\text{атм}}{^\circ\text{C}}$$

10. Окончив измерения при 35,05 °С, сделаем такие же измерения, как указано в пунктах 3-7, для температуры 50,02 °С (см. Таблицу 3).

Таблица 3

	Погрешность	1	2	3	4
$\Delta P$ , атм	0,05	4,00	3,50	3,00	2,60
$U(P)-U(0)$ , мкВ	1	176	160	146	134
$\Delta T$ , °С	0,1	4,1	3,7	3,4	3,1

Отложив полученные точки на графике  $\Delta T(\Delta P)$ , по наклону графика определим коэффициент Джоуля-Томсона для выбранной нами температуры (см. рис.4)

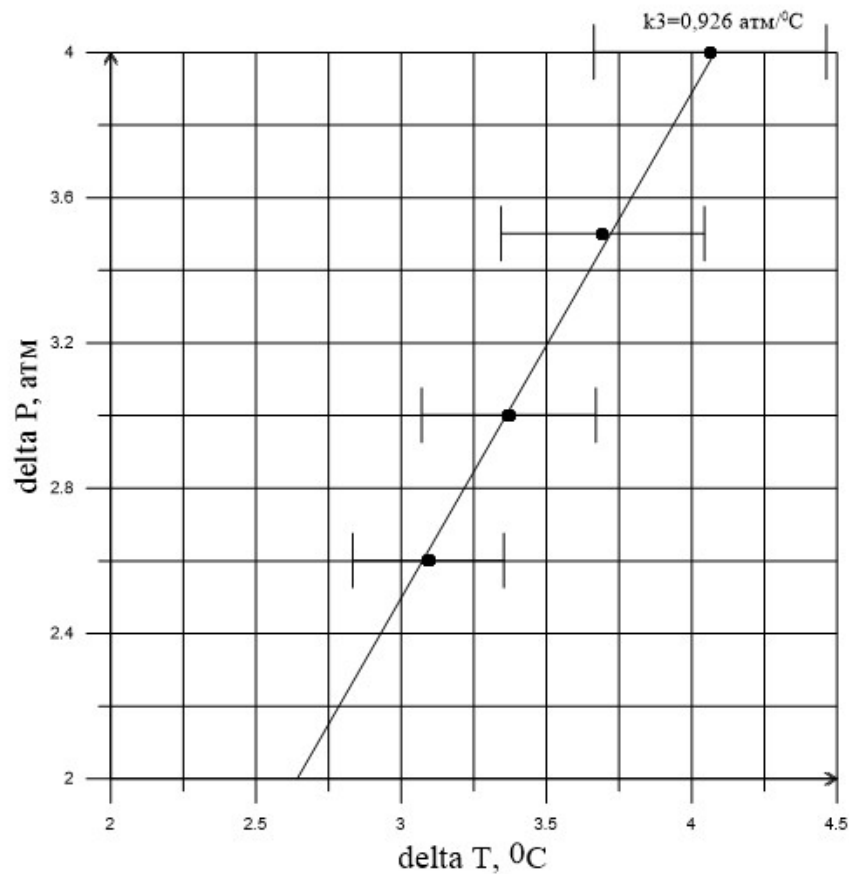


Рисунок 4

Используя метод наименьших квадратов, получаем:

$$k_3 = \frac{\langle \Delta P \Delta T \rangle}{\langle \Delta T^2 \rangle} = \frac{11,84}{12,78} \approx 0,926 \frac{\text{атм}}{^{\circ}\text{C}}$$

$$\sigma_{k_3} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_P}{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{\Delta T}\right)^2} = \sqrt{0,000245574 + 0,000807068} = 0,032444432 \approx 0,032 \frac{\text{атм}}{^{\circ}\text{C}}$$

$$k_3 = (0,926 \pm 0,032) \frac{\text{атм}}{^{\circ}\text{C}}$$

11. Используя формулу  $k = \frac{\Delta T}{\Delta P} \approx \frac{\frac{2a}{RT} - b}{C_p}$  и экспериментальные данные, полученные при трех значениях температуры, определим постоянные  $a$  и  $b$  для углекислого газа по двум парам температур: комнатной и  $35,05^{\circ}\text{C}$ , а также  $35,05^{\circ}\text{C}$  и  $50,02^{\circ}\text{C}$ . Найдем  $T_{\text{инв}}$  для углекислого газа при помощи формулы  $T_i = \frac{2a}{Rb}$

Найдем  $a$  и  $b$  при комнатной и  $35,05^{\circ}\text{C}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1 = \frac{\Delta T}{\Delta P} \approx \frac{\frac{2a}{8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}} * 293,05 \text{ K}} - b}{41 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}}} = 1,228 \frac{\text{атм}}{^{\circ}\text{C}}, \\ k_2 = \frac{\Delta T}{\Delta P} \approx \frac{\frac{2a}{8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}} * 308,05 \text{ K}} - b}{41 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}}} = 0,93 \frac{\text{атм}}{^{\circ}\text{C}}. \end{array} \right.$$

Отсюда получаем:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = 3,02 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{моль}^2}, \\ b = 1980 \frac{\text{см}^3}{\text{моль}}. \end{array} \right.$$

Найдем  $a$  и  $b$  при  $35,05^{\circ}\text{C}$  и  $50,02^{\circ}\text{C}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} k_3 = \frac{\Delta T}{\Delta P} \approx \frac{\frac{2a}{8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}} * 323,02 \text{ K}} - b}{41 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}}} = 0,926 \frac{\text{атм}}{^{\circ}\text{C}}, \\ k_2 = \frac{\Delta T}{\Delta P} \approx \frac{\frac{2a}{8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}} * 308,05 \text{ K}} - b}{41 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}}} = 0,93 \frac{\text{атм}}{^{\circ}\text{C}}. \end{array} \right.$$

Отсюда получаем:

$$\begin{cases} a=0,0447 \frac{H * M^4}{\text{моль}^2}, \\ b=341 \frac{\text{см}^3}{\text{моль}}. \end{cases}$$

Полученные коэффициенты отличаются не только между собой в несколько раз, но и от табличных ( $a=0,36(H * M^4) / \text{моль}^2$ ,  $b=42,84 \text{ см}^3 / \text{моль}$ ), поэтому бессмысленно считать погрешности измерений данных коэффициентов.

Посчитает  $T_{\text{инв}}$  для двух пар  $a$  и  $b$ :

$$\begin{cases} T_{\text{инв}1} = 367 \text{ K}, \\ T_{\text{инв}2} = 31,5 \text{ K}. \end{cases}$$

12. Сравним полученные значения с табличными.

Данные, полученные в ходе работы не сходятся с табличными в пределах погрешностей, ближе к табличным значениям получились значения, полученные при комнатной температуре и  $35,05^\circ\text{C}$ , однако они все равно очень разнятся с табличными. Это говорит о неточности уравнения Ван-дер-Ваальса.

## Вывод

Полученные в ходе эксперимента коэффициента Джоуля-Томсона сходятся с табличными в пределах погрешностей(см. Таблицу 4):

Таблица 4

Температура, $^\circ\text{C}$	Табличное значение $k$ , [атм/ $^\circ\text{C}$ ]	Экспериментальное значение $k$ , [атм/ $^\circ\text{C}$ ]	Погрешность, $\pm$ атм/ $^\circ\text{C}$
20,05	1,105	1,228	0,051
35,05	0,958	0,93	0,04
50,02	0,838	0,926	0,032

Также мы получили 3 графика зависимости  $\Delta T(\Delta P)$ (см. рис. 2,3,4). Коэффициенты  $a$  и  $b$  и  $T_{\text{инв}}$  в несколько раз отличаются не только между собой, но и сильно разнятся с табличными значениями. Возможные причины расхождения результатов:

1. Мы считаем, что трубка 1 хорошо теплоизолирована, что, скорее всего, не так.
2. Мы считали, что энтальпия газа не меняется(макроскопическая скорость газа с обеих сторон трубки достаточно мала)
3. Мы считаем, что  $\Delta T$  много меньше, чем  $T$ , однако в наших опытах  $\Delta T$  составляет 8,2-17% от  $T$ .