

Отчёт о выполненной лабораторной работе

Эффект Джоуля–Томсона (2.1.6)

Каплин Артём Б01-402

24 марта 2025

1 Введение

Цель работы: : 1) определить изменения температуры углекислого газа при протекании через малопроницаемую перегородку при разных начальных значениях температуры, вычислить коэффициент Джоуля–Томсона; 2) вычислить по результатам опытов коэффициенты a и b модели Вандер-Ваальса, а также температуру инверсии $T_{\text{инв}}$.

Оборудование: трубка с пористой перегородкой; труба Дьюара; термостат жидкостной; термомпара; вольтметр универсальный цифровой; баллон с углекислым газом; манометр.

2 Теоретические сведения

Эффектом Джоуля–Томсона называется изменение температуры газа при его адиабатическом дросселировании. Процесс дросселирования — это медленное протекание газа через дроссель под воздействием перепада давления. Дросселем можно назвать препятствие потоку газа в трубе в виде, например, пористой перегородки. Почти полностью закрытый и слегка пропускающий газ кран также можно считать дросселем. Пористой перегородкой может служить диск из керамики или пористого стекла. При дросселировании температура газа может как увеличиваться, так и уменьшаться. Очевидно, что такой процесс необратим. Рассмотрим его подробнее.

Получим теоретическое выражения для расчёта величины эффекта Джоуля–Томсона.

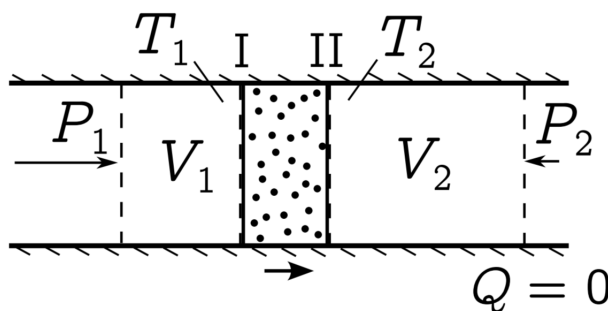


Рис. 1: Принципиальная схема эффекта Джоуля–Томсона

На рис. (1) изображена адиабатически изолированная труба с пористой перегородкой. Заметим, что разность давлений всегда $P_2 - P_1 = \Delta P < 0$, что говорит о существенной необратимости этого процесса. В силу его адиабатичности можно записать очевидное равенство:

$$Q = 0 = U_2 - U_1 + P_2V_2 - P_1V_1 \quad (1)$$

Здесь работа внешних сил равна $P_1 V_1 < 0$, а $P_2 V_2$ — работа самого газа, она положительна. Отсюда следует, что:

$$U_1 + P_1 V_1 = U_2 + P_2 V_2, \quad \text{т.е.} \quad I_1 = I_2. \quad (2)$$

Значит, процесс дросселирования происходит при постоянстве энтальпии.

В качестве характеристики процесса дросселирования введем величину, называемую коэффициентом Джоуля–Томсона:

$$\mu = \frac{\Delta T}{\Delta P}, \quad (3)$$

которая определяет эффект Джоуля–Томсона количественно. Поскольку для идеального газа энтальпия — однозначная функция температуры, то в связи с постоянством энтальпии для идеального газа $\Delta T = 0$, т.е. и $\mu = 0$. Конечно, для реального газа это уже далеко не так.

Рассмотрим так называемый дифференциальный эффект Джоуля–Томсона, т.е. эффект при малом перепаде давления на дросселе.

$$\mu = \left(\frac{\Delta T}{\Delta P} \right)_I \approx \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_I. \quad (4)$$

Запишем дифференциал энтальпии как функцию T и P :

$$dI(T, P) = \left(\frac{\partial I}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial I}{\partial P} \right)_T dP = 0. \quad (5)$$

Отсюда частная производная:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_I = \mu = - \frac{\left(\frac{\partial I}{\partial P} \right)_T}{\left(\frac{\partial I}{\partial T} \right)_P} = - \frac{1}{C_P} \left(\frac{\partial I}{\partial P} \right)_T. \quad (6)$$

Известна каноническая зависимость энтальпии от температуры и энтропии:

$$dI = T dS + V dP, \quad (7)$$

Откуда при постоянной температуре искомая частная производная $\left(\frac{\partial I}{\partial P} \right)_T$ равна:

$$\left(\frac{\partial I}{\partial P} \right)_T = T \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_T + V = -T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P + V. \quad (8)$$

Подставляя ее в (6), получим общее выражение для коэффициента Джоуля–Томсона при малом перепаде давления:

$$\mu \approx \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_I = \frac{T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P - V}{C_P}. \quad (9)$$

Теперь из общего выражения (9) найдем коэффициент Джоуля–Томсона для газа Ван-дер-Ваальса. Для этого надо продифференцировать уравнение Ван-дер-Ваальса () по температуре, считая давление P постоянным:

$$-\frac{2a}{V^3} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P (V - b) + \left(P + \frac{a}{V^2} \right) \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = R. \quad (10)$$

Искомая частная производная равна:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = \frac{R}{P + \frac{a}{V^2} - \frac{2a(V-b)}{V^3}} = \frac{R(V-b)}{RT - \frac{2a(V-b)^2}{V^3}}. \quad (11)$$

Для начала будем считать газ не очень плотным. Кроме того, пренебрежем величинами второго порядка относительно поправок b и a . Тогда:

$$T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \approx \frac{V - b}{1 - \frac{2a}{RTV}} \approx (V - b) \left(1 + \frac{2a}{RTV} \right) \approx V + \frac{2a}{RT} - b. \quad (12)$$

Если подставить (9) в формулу для эффекта Джоуля–Томсона (12), получим окончательно:

$$\mu = \frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{\frac{2a}{RT} - b}{C_P}. \quad (13)$$

Из этого выражения для μ сразу видно, что изменение температуры газа Ван-дер-Ваальса при необратимом расширении определяется поправками a и b . При $a = b = 0$ $\mu = 0$. Кроме того, поправки a и b по-разному влияют на знак эффекта. Если силы взаимодействия между молекулами велики и преобладает поправка на давление, то можно считать $b = 0$, и тогда $\mu > 0$, т.е. $\Delta T < 0$ (газ охлаждается). Если силы взаимодействий малы и $a \rightarrow 0$, то преобладает поправка на объем b . В этом случае $\mu < 0$, и газ нагревается, т.е. $\Delta T > 0$ ($\Delta P < 0$).

3 Экспериментальная установка

Схема установки для исследования эффекта Джоуля–Томсона в углекислом газе представлена на рис. 2. Основным элементом установки является трубка 1 с пористой перегородкой 2, через которую пропускается двуокись углерода CO_2 . Углекислый газ под повышенным давлением поступает в трубку через змеевик 5 из балластного баллона 6. Медный змеевик омывается водой и нагревает медленно протекающий через него газ до температуры воды в термостате. Температура воды измеряется встроенным в термостат термометром. Давление газа в трубке измеряется манометром М и регулируется вентилем В. Манометр М измеряет разность между давлением внутри трубки и наружным (атмосферным) давлением. Разность температур газа до и после перегородки измеряется термопарой медь–константан.

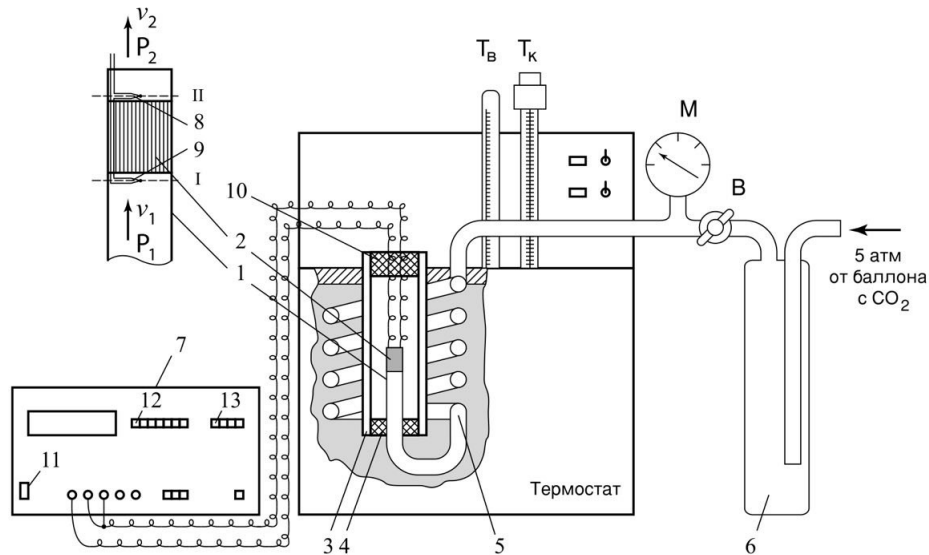


Рис. 2: Рис. 2. Экспериментальная установка

4 Приборы и данные

- Цифровой мультиметр В7-78/1, погрешность измерения постоянного напряжения $0,0035\% + 0,0005\%$ диапазона.

- Манометр WIKA EN 837-1, класс точности 1,0.
- Термостат жидкостный ТЖ-ТС-01, погрешность установления заданной температуры не более $0,02^{\circ}\text{C}$, погрешность поддержания температуры не более $0,01^{\circ}\text{C}$.

5 Ход работы

1. Убедимся, что термостат залит водой, все электрические приборы заземлены.
2. Включим термостат.
3. Включим вольтметр . Начальные показания приборов $t_0 = 13,9^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon_0 = -0,002\text{мВ}$, где t_0 - начальная температура термостата с водой, ε_0 - показания вольтметра
4. Проведем измерения при температурах $T_1 = 15^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 33^{\circ}\text{C}$, $T_3 = 45^{\circ}\text{C}$, $T_4 = 57^{\circ}\text{C}$. Полученные данные представлены в приложении.
5. Построим график зависимости разности температур от перепада давления по МНК для четырёх температур.

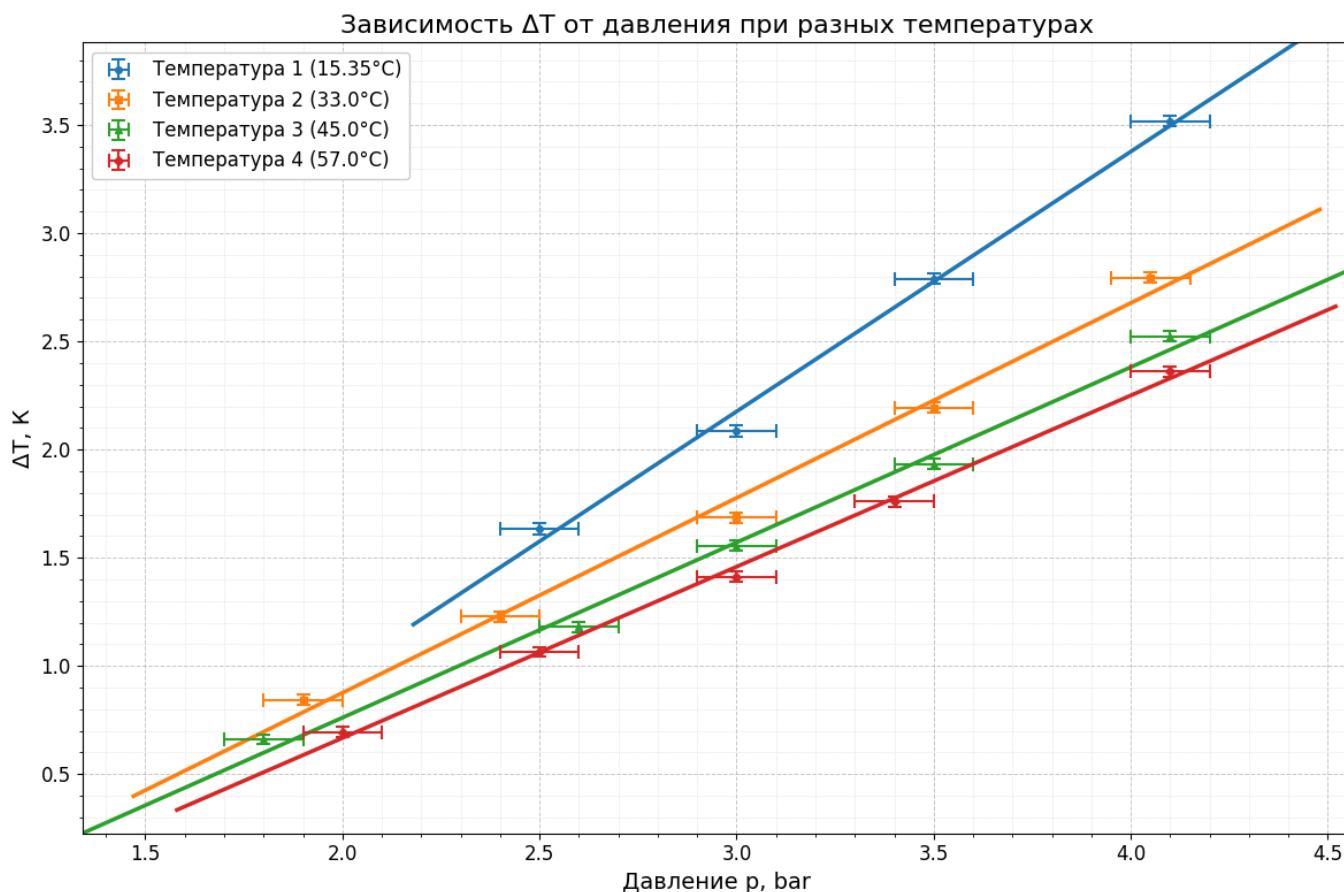


Рис. 3: График №1 Зависимость разности температур от перепада давления $\Delta T(\Delta P)$

6. По наклону прямых получим значения коэффициентов Джоуля-Томсона для разных температур воды в термостате.
7. По полученным коэффициентам Джоуля-Томсона построим график зависимости.
- 8.

$$k = (963 \pm 157) \frac{\text{K}^2}{\text{бар}} \quad \varepsilon_k = 16,3\% \quad b = \mu_0 = (-2.180 \pm 0.508) \frac{\text{K}}{\text{бар}} \quad \varepsilon_{\mu_0} = 23\%$$

№	$\mu, \frac{\text{K}}{\text{бар}}$	$\sigma_\mu, \frac{\text{K}}{\text{бар}}$	$\varepsilon, \%$
1	1.201	0.046	3.87
2	0.901	0.035	3.88
3	0.810	0.030	3.75
4	0.792	0.018	2.24

Таблица 1: Таблица 5. Коэффициенты Джоуля-Томсона

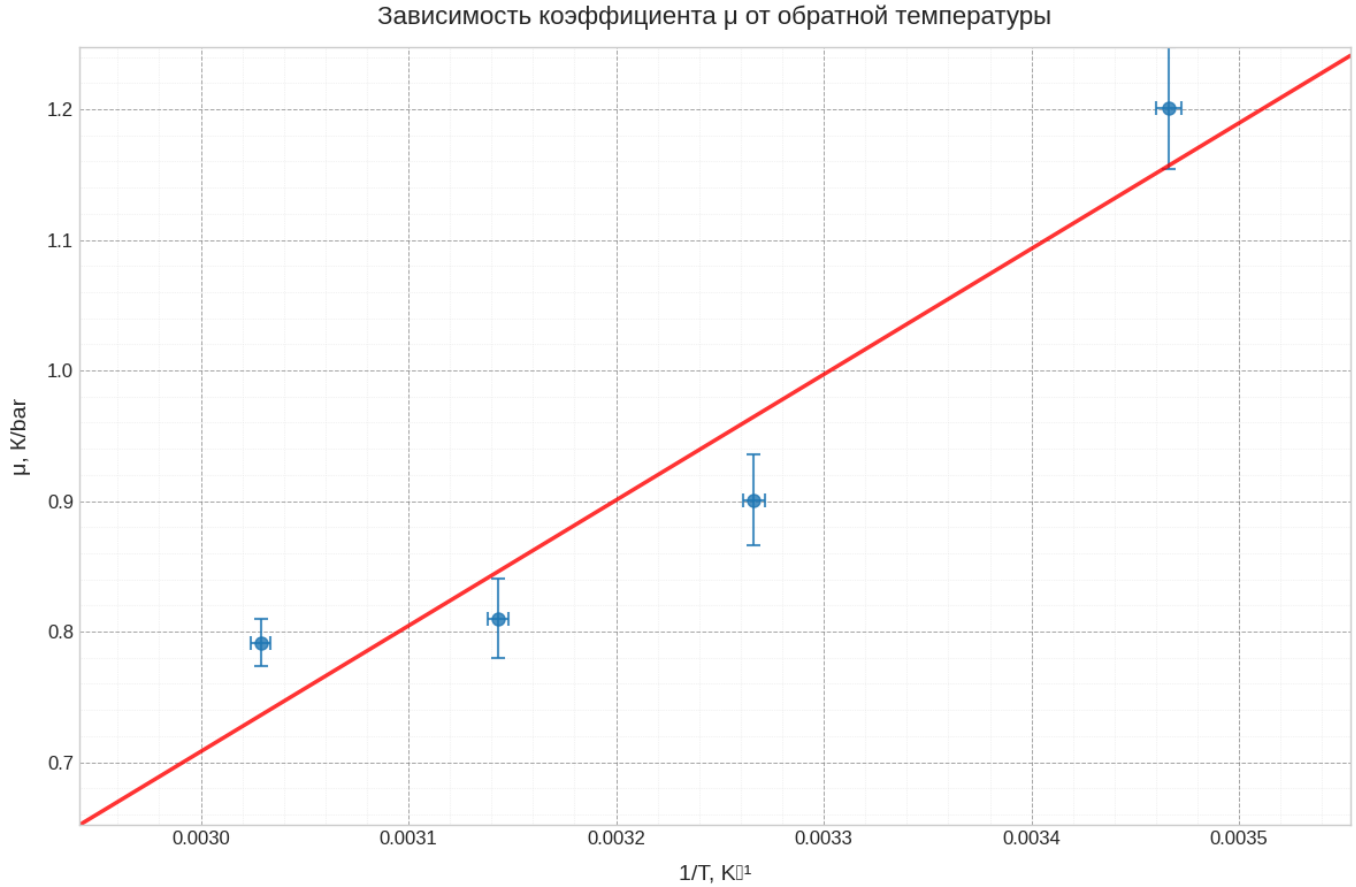


Рис. 4: График 2. Зависимости коэффициента Джоуля-Томсона от обратной температуры

9. Найдем коэффициенты a и b для соответствующих температур попарно по формулам:

$$a = \frac{kRC_p}{2} \quad b = \mu_0 C_p,$$

где $C_p = 37,1 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}}$ табличное значение, взятое с книги Лабораторный практикум.

$$a = (1,484 \pm 0,242) \frac{\text{H} \cdot \text{м}^4}{\text{моль}^2} \quad \varepsilon_a = 16,3\% \quad b = (8,09 \pm 1,86) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}} \quad \varepsilon_b = 23\%$$

10. По полученным коэффициентам определим температуру инверсии $T_{\text{инв}}$

$$T_{\text{инв}} = \frac{2a}{Rb} = (441,3 \pm 124,3) \text{ K} \quad (\varepsilon = 16,89\%)$$

6 Выводы

В ходе лабораторной работы мы получили экспериментальные значения коэффициентов Джоуля-Томсона для разных температур, построили соответствующие графики. По найденным значениям

ям построили график зависимости $\mu(\frac{1}{T})$ нашли соответствующие коэффициенты прямой данного графика и по ним нашли коэффициенты a и b для модели реального газа Ван-Дер-Вальса. Приведём сравнительную таблицу результатов экспериментов, табличные значения взяты при критических параметрах.

	Экспер.	Табл.	σ	ε %
$a, \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^4}{\text{моль}^2}$	1.484	0.365	0.242	16.3
$b, \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$	8.09×10^{-4}	42.79×10^{-4}	1.86×10^{-4}	23
$T_{\text{инв}}, \text{К}$	441.3	2073	124.3	16.89

7 Приложение

$P, \text{бар}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$\Delta T, ^\circ \text{C}$	$\varepsilon_{\Delta T}, \%$	$\sigma_{\Delta T}, ^\circ \text{C}$
4.10 ± 0.06	0.140 ± 0.001	3.518	0.71	0.025
3.50 ± 0.06	0.111 ± 0.001	2.789	0.90	0.025
3.00 ± 0.06	0.083 ± 0.001	2.085	1.20	0.025
2.50 ± 0.06	0.065 ± 0.001	1.633	1.54	0.025

Таблица 2: При температуре $15,35^\circ \text{C}$

$P, \text{бар}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$\Delta T, ^\circ \text{C}$	$\varepsilon_{\Delta T}, \%$	$\sigma_{\Delta T}, ^\circ \text{C}$
4.05 ± 0.06	0.116 ± 0.001	2.795	0.86	0.024
3.50 ± 0.06	0.091 ± 0.001	2.193	1.10	0.024
3.00 ± 0.06	0.070 ± 0.001	1.687	1.43	0.024
2.40 ± 0.06	0.051 ± 0.001	1.229	1.96	0.024
1.90 ± 0.06	0.035 ± 0.001	0.843	2.86	0.024

Таблица 3: При температуре 33°C

$P, \text{бар}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$\Delta T, ^\circ \text{C}$	$\varepsilon_{\Delta T}, \%$	$\sigma_{\Delta T}, ^\circ \text{C}$
4.10 ± 0.06	0.107 ± 0.001	2.524	0.93	0.023
3.50 ± 0.06	0.082 ± 0.001	1.934	1.22	0.024
3.00 ± 0.06	0.066 ± 0.001	1.557	1.52	0.024
2.60 ± 0.06	0.050 ± 0.001	1.179	2.00	0.024
1.80 ± 0.06	0.028 ± 0.001	0.660	3.57	0.024

Таблица 4: При температуре 45°C

$P, \text{бар}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$\Delta T, ^\circ \text{C}$	$\varepsilon_{\Delta T}, \%$	$\sigma_{\Delta T}, ^\circ \text{C}$
4.10 ± 0.06	0.102 ± 0.001	2.361	0.98	0.023
3.40 ± 0.06	0.076 ± 0.001	1.759	1.32	0.023
3.00 ± 0.06	0.061 ± 0.001	1.412	1.64	0.023
2.50 ± 0.06	0.046 ± 0.001	1.065	2.17	0.023
2.00 ± 0.06	0.030 ± 0.001	0.694	3.33	0.023

Таблица 5: При температуре 57°C