

# Лабораторная работа 2.1.6 «Эффект Джоуля-Томсона»

Балдин Виктор, Б01-303

17 марта 2024 г.

## Цель работы

1. Определение изменения температуры углекислого газа при протекании через малопроницаемую перегородку при разных начальных значениях.
2. Вычисление по результатам опытов коэффициентов Ван-дер-Ваальса  $a$  и  $b$ .

**Оборудование** Трубка с пористой перегородкой; труба Дьюара; термостат, термометры; дифференциальная термopара; микровольтметр; балластный баллон; манометр.

## 1 Теоретическая часть

Рассмотрим стационарный поток газа между произвольными сечениями трубки и пористой перегородкой. Для 1 моля можно записать первое начало термодинамики:

$$A_1 - A_2 = \left( U_2 + \frac{\mu v_2^2}{2} \right) - \left( U_1 + \frac{\mu v_1^2}{2} \right), \quad (1)$$

где  $A_1 = P_1 V_1$  – работа над газом, необходимая для внесения его в первое сечение трубки,  $A_2 = P_2 V_2$  – работа газа по прохождению второго сечения. Используя уравнение 1, получим:

$$H_1 - H_2 = (U_1 + P_1 V_1) - (U_2 + P_2 V_2) = \frac{1}{2} \mu (v_2^2 - v_1^2) \quad (2)$$

Или:

$$C_P (T_1 - T_2) = \frac{1}{2} \mu (v_2^2 - v_1^2), \quad (3)$$

откуда:

$$\Delta T = \frac{\mu}{2C_P} (v_2^2 - v_1^2) \quad (4)$$

При этом:

$$v_1 = \frac{P_2}{P_1} v_2 \quad (5)$$

Таким образом, для углекислого газа оценка по формуле 4 дает  $\Delta T = 7 \cdot 10^{-4}$  К, что ничтожно мало по сравнению с измеряемым эффектом.

**Эффект Джоуля-Томсона** Для дифференциального эффекта Джоуля-Томсона имеем:

$$\Delta T = \frac{\frac{2a}{RT} - b}{C_P} \Delta P, \quad (6)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты в уравнении Ван-дер-Ваальса:

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT \quad (7)$$

Таким образом,  $a$  и  $b$  можно получить из нескольких пар значений  $(\mu, T)$ , где

$$\mu = \frac{\frac{2a}{RT} - b}{C_P} \quad (8)$$

Через коэффициенты Ван-дер-Ваальса находим температуру инверсии эффекта Джоуля-Томсона:

$$T_i = \frac{2a}{Rb} \quad (9)$$

Критическая точка газа определяется условиями:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T = 0, \quad \left(\frac{\partial^2 P}{\partial V^2}\right)_T = 0, \quad (10)$$

откуда, используя уравнение 7, получим все параметры газа в критической точке:

$$V_k = 3b, \quad T_k = \frac{8a}{27Rb}, \quad P_k = \frac{a}{27b^2} \quad (11)$$

Связывая формулы 9 и 11, получим:

$$T_i = \frac{27}{4} T_k \quad (12)$$

## 2 Экспериментальная установка

Схема используемой установки приведена на рис. 1. Основным элементом установки является трубка 1 с пористой перегородкой 2, через которую пропускается исследуемый газ. Трубка имеет длину  $L = 80$  мм и сделана из нержавеющей стали в силу ее малой теплопроводности. Диаметр трубки  $d = 3$  мм, толщина стенок 0.2 мм. Толщина трубки  $l = 5$  мм подобрана так, чтобы обеспечить оптимальный поток газа при перепаде давлений  $\Delta P \leq 4$  атм, при этом в результате эффекта Джоуля-Томсона создается достаточная разность температур.

Давление газа измеряется манометром М и регулируется вентилем В. Манометр М измеряет разность с атмосферным давлением  $\Delta P = P_1 - P_2$ .

Разность температур газа до перегородки и после нее измеряется дифференциальной термопарой медь – константан.

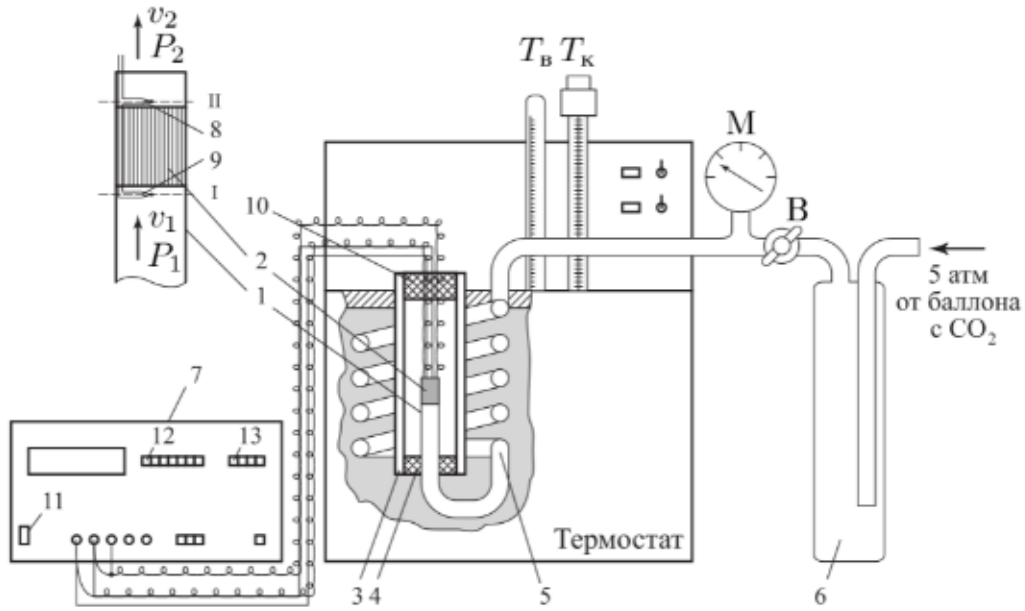


Рис. 1: Схема экспериментальной установки для изучения эффекта Джоуля-Томсона

### 3 Ход работы

1. Убедимся, что термостат залит водой, все электрические приборы заземлены.
2. Включим термостат.
3. Включим вольтметр 7. Получим показания вольтметра при  $\Delta P = 0$ , используем ее для корректировки:  $\mathcal{E} = U(P) - U(0)$ .
4. Проведем измерения при температурах  $T_1 = 17^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 30^\circ\text{C}$ ,  $T_3 = 40^\circ\text{C}$ ,  $T_4 = 50^\circ\text{C}$ . Полученные данные представим в таблице 1.

$P, \text{ A}$	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5
$U_1, \text{ мкВ}$	136	105	85	64	44	29
$U_2, \text{ мкВ}$	107	89	70	49	34	18
$U_3, \text{ мкВ}$	101	80	63	43	27	15
$U_4, \text{ мкВ}$	94	73	56	41	26	13
$\Delta T_1, \text{ K}$	3.42	2.64	2.14	1.61	1.11	0.73
$\sigma_{\Delta T_1}, \text{ K}$	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
$\Delta T_2, \text{ K}$	2.58	2.14	1.69	1.18	0.82	0.43
$\sigma_{\Delta T_2}, \text{ K}$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
$\Delta T_3, \text{ K}$	2.38	1.89	1.49	1.01	0.64	0.35
$\sigma_{\Delta T_3}, \text{ K}$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
$\Delta T_4, \text{ K}$	2.18	1.69	1.30	0.95	0.60	0.30
$\sigma_{\Delta T_4}, \text{ K}$	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04

Таблица 1: Значения  $\Delta T(P)$  при разных температурах

5. По результатам измерений построим графики  $\Delta T(P)$  на рисунке 2.

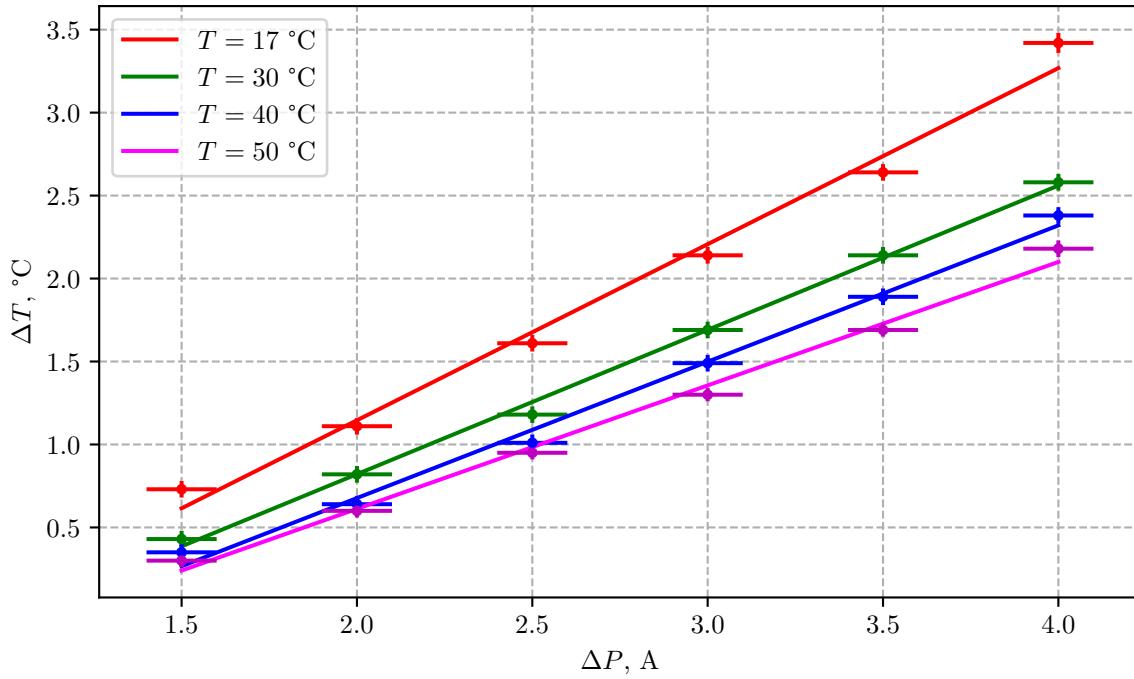


Рис. 2: Графики  $\Delta T(\Delta P)$

6. Найдем коэффициенты Джоуля-Томсона методом наименьших квадратов. Погрешности рассчитаем по формулам:

$$\sigma_{\mu}^{\text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left( \frac{\langle \Delta T^2 \rangle}{\langle P^2 \rangle} - \mu^2 \right)}, \quad (13)$$

$$\sigma_{\mu}^{\text{сист}} = \mu \sqrt{\varepsilon_{\Delta T}^2 + \varepsilon_P^2}, \quad (14)$$

$$\sigma_{\mu} = \sqrt{(\sigma_{\mu}^{\text{случ}})^2 + (\sigma_{\mu}^{\text{сист}})^2} \quad (15)$$

7. Результаты для разных температур представим в таблице 2 и на графике  $\mu(T^{-1})$  (рис. 3).

$T, ^\circ\text{C}$	$T^{-1}, 10^{-3} \text{ K}^{-1}$	$\mu, 10^{-5} \text{ K/Па}$	$\sigma_{\mu}, 10^{-5} \text{ K/Па}$	$\varepsilon_{\mu}, \%$
17	3.45	1.06	0.05	5
30	3.30	0.87	0.04	5
40	3.19	0.82	0.04	5
50	3.10	0.74	0.03	5

Таблица 2: Значения  $\mu(T)$

8. По графику 3 и с помощью формулы 8 найдем  $a$  и  $b$  (см. таблицу 3).

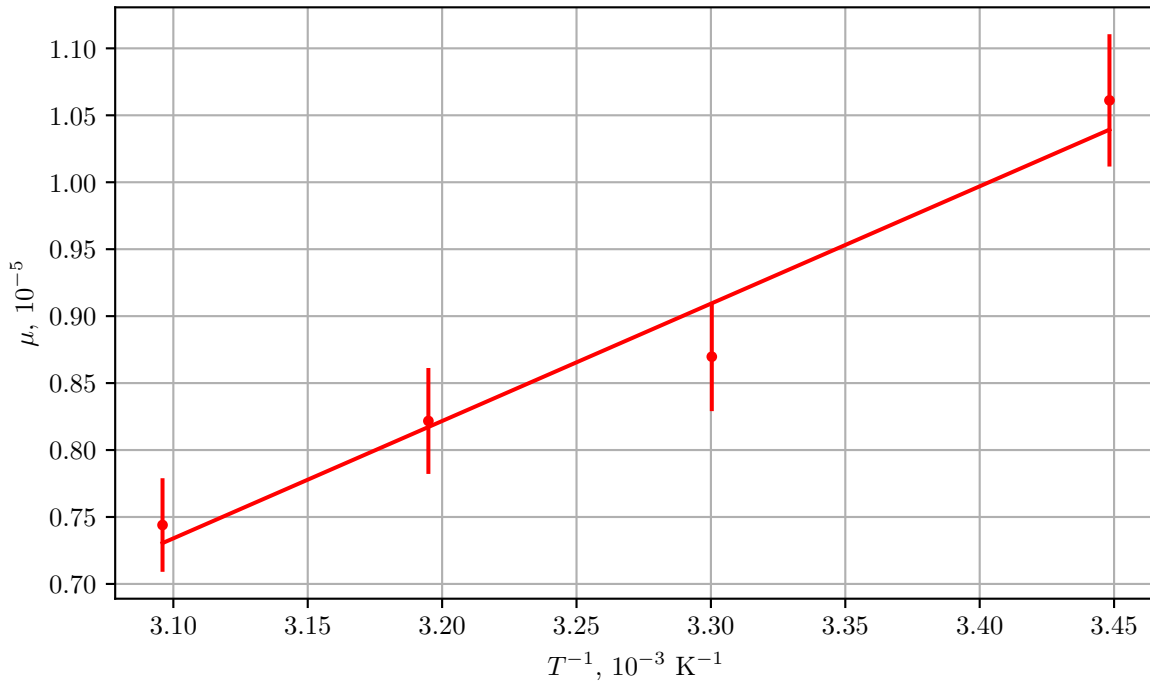


Рис. 3: График  $\mu(T^{-1})$

	$a, \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{К} \cdot \text{моль}^2}$	$b, 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$
Значение	1.06	5.77
$\sigma$	0.14	0.75
$\varepsilon, \%$	13	13

Таблица 3: Коэффициенты Ван-дер-Ваальса

9. По формуле 9 найдем температуру инверсии для углекислого газа  $T_i = (442 \pm 115) \text{ K}$ ,  $\varepsilon_{T_i} = \varepsilon_a + \varepsilon_b = 26\%$ .
10. Табличные данные для углекислого газа  $a = 0.36 \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{К} \cdot \text{моль}^2}$ ,  $b = 0.43 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$ ,  $T_{\text{инв}} = 2000 \text{ K}$ .

## 4 Вывод

В ходе работы мы выявили экспериментально наличие эффекта Джоуля-Томсона, показали его линейность с неплохой степенью точности. Вычислив коэффициенты  $a$  и  $b$ , мы обнаружили расхождение с табличными значениями на целый порядок, поэтому наш опыт показывает, что модель газа Ван-дер-Ваальса способна описывать поведение газа лишь при малых отклонениях температуры, в реальности расхождение слишком велико, чтобы считать ее адекватной.