Лабораторная работа 2.1.6
«Эффект Джоуля-Томсона»

Балдин Виктор, Б01-303

12 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; дифференицальная термопара; 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:

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

где $A_1 = P_1V_1$ – работа над газом, необходимая для внесения его в первое сечение трубки, $A_2 = P_2V_2$ – работа газа по прохождению второго сечения. Используя уравнение 1, получим:

$$H_1 - H_2 = (U_1 + P_1V_1) - (U_2 + P_2V_2) = \frac{1}{2}\mu(v_2^2 - v_1^2) \tag{2}$$

Или:

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

откуда:

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

При этом:

$$v_1 = \frac{P_2}{P_1}v_2 \tag{5}$$

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:

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

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

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

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

$$\mu = \frac{\frac{2a}{RT} - b}{C_P} \tag{8}$$

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

$$T_i = \frac{2a}{Rb} \tag{9}$$

2 Экспериментальная установка

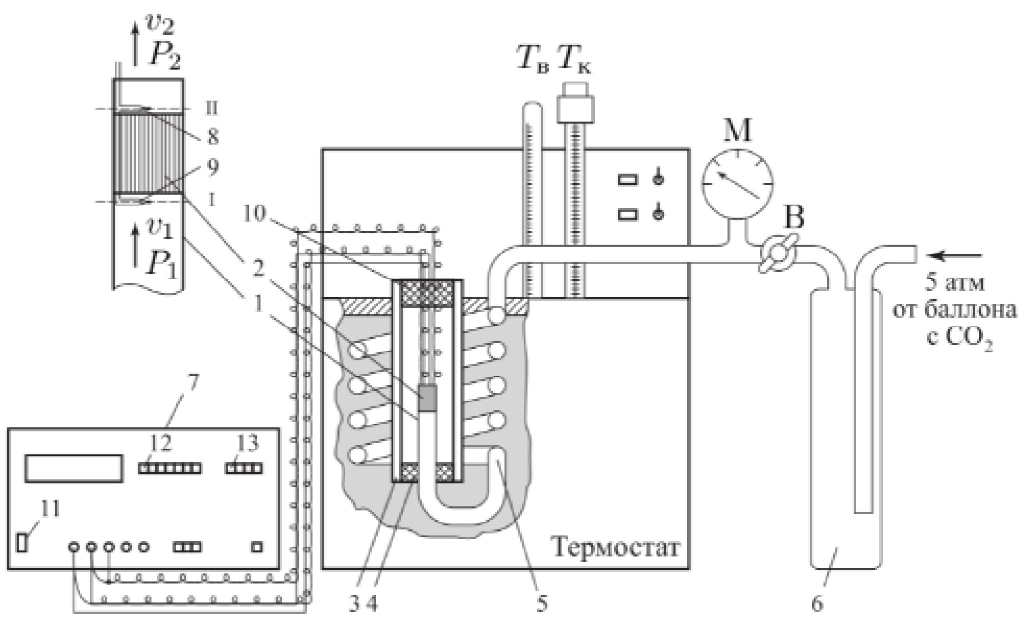

Рис. 1: Схема экспериментальной установки для изучения эффекта Джоуля-Томсона

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

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

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: $\mathscr{E} = U(P) - U(0)$.

4. Проведем измерения при температурах $T_1 = 17$ °C, $T_2 = 30$ °C, $T_3 = 40$ °C, $T_4 = 50$ °C. Полученные данные представим в таблице 1.

P, А	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5
U_1, мкВ	136	105	85	64	44	29
U_2, мкВ	107	89	70	49	34	18
U_3, мкВ	101	80	63	43	27	15
U_4, мкВ	94	73	56	41	26	13
ΔT_1, К	3.42	2.64	2.14	1.61	1.11	0.73
$\sigma_{\Delta T_1}$, К	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
ΔT_2, К	2.58	2.14	1.69	1.18	0.82	0.43
$\sigma_{\Delta T_2}$, К	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
ΔT_3, К	2.38	1.89	1.49	1.01	0.64	0.35
$\sigma_{\Delta T_3}$, К	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
ΔT_4, К	2.18	1.69	1.30	0.95	0.60	0.30
$\sigma_{\Delta T_4}$, К	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.

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

$$\sigma_\mu^{\text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{N-1}\left(\frac{\langle \Delta T^2 \rangle}{\langle P^2 \rangle} - \mu^2\right)}, \tag{10}$$

$$\sigma_\mu^{\text{сист}} = \mu\sqrt{\varepsilon_{\Delta T}^2 + \varepsilon_P^2}, \tag{11}$$

$$\sigma_\mu = \sqrt{(\sigma_\mu^{\text{случ}})^2 + (\sigma_\mu^{\text{сист}})^2} \tag{12}$$

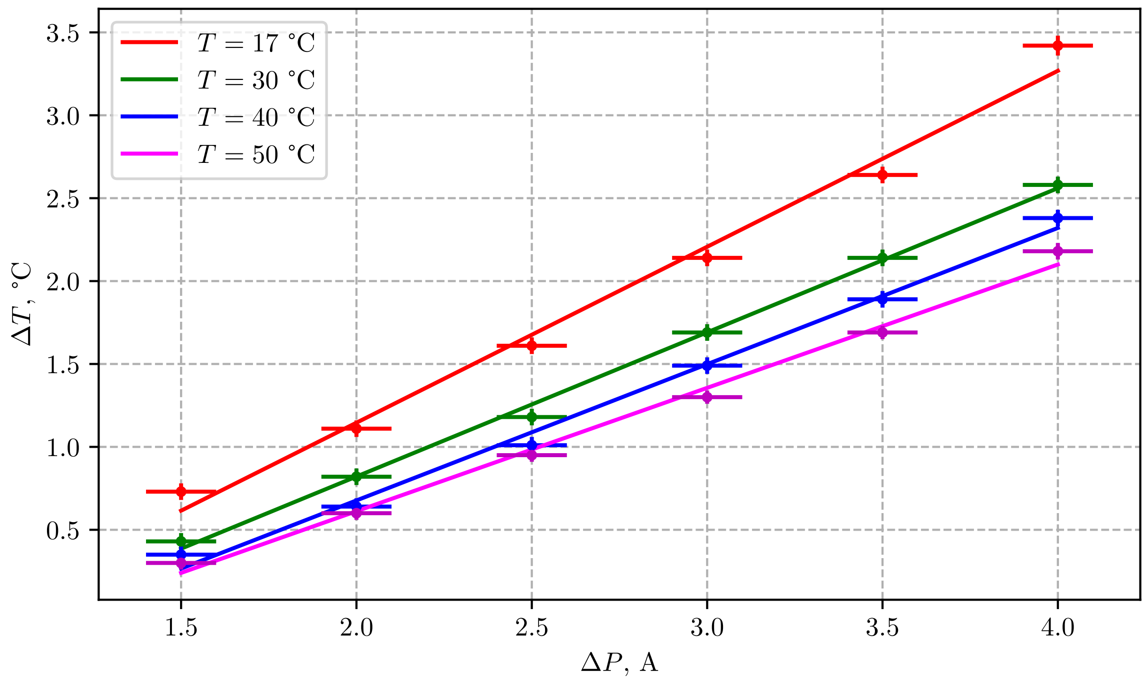

Рис. 2: Графики $\Delta T(\Delta P)$

T, °C	T^{-1}, 10^{-3} К$^{-1}$	μ, 10^{-5} К/Па	σ_μ, 10^{-5} К/Па	ε_μ, %
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 $\mu(T)$

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

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

	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
σ	0.14	0.75
ε, %	13	13

Таблица 3: Коэффициенты Ван-дер-Ваальса

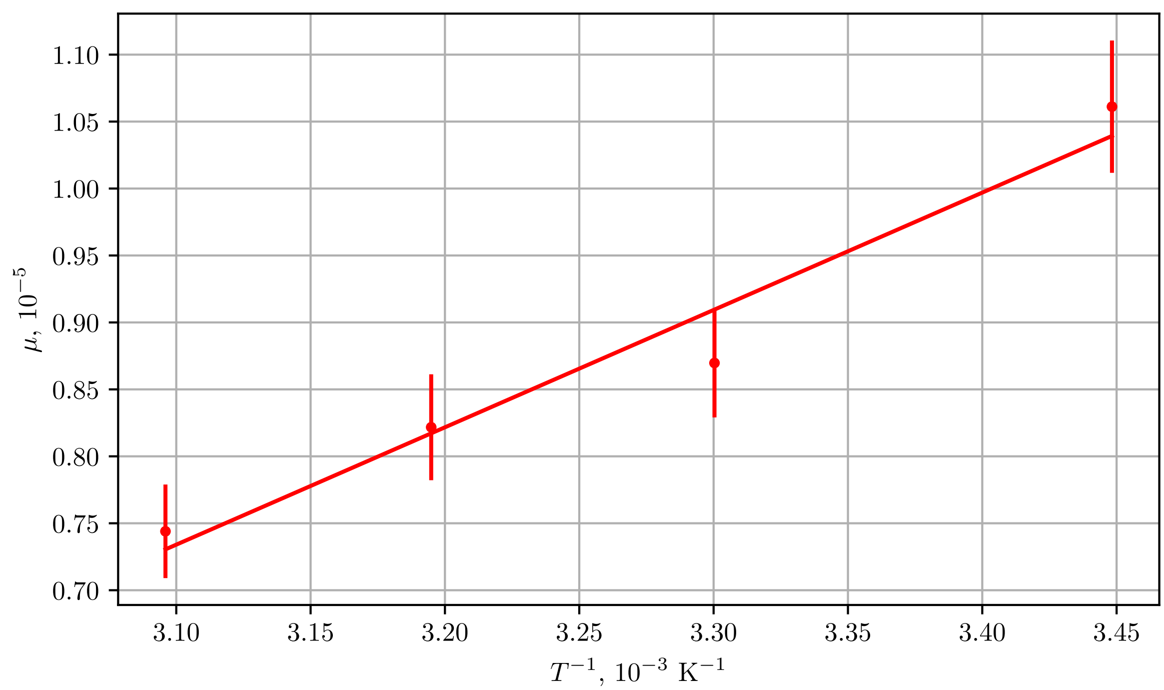

Рис. 3: График $\mu(T^{-1})$