

Лабораторная работа 2.1.6 «Эффект Джоуля-Томсона»

Комкин Михаил, Б01-303

19 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 термопара; микровольтметр; балластный баллон; манометр.

1 Теоретическая часть

Эффектом Джоуля-Томсона называется изменение температуры газа, медленно протекающего из области высокого давления 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. Трубка 1 хорошо теплоизолирована. 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 заменен даже при малой скорости течения газа в трубке. Величина эффекта Джоуля-Томсона определяется по разности температуры газа до и после перегородки. Рассмотрим стационарный поток газа между произвольными сечениями трубки и пористой перегородкой. Так как через боковые стенки не происходит ни обмен тепла, ни механическая работа, 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. 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 газа T_1 задаётся термостатом. Измерения проводятся при трёх температурах: комнатной, 50 °С и 80 °С.

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 (μ, T) , где

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

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

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

2 Экспериментальная установка

Схема установки для исследования эффекта Джоуля-Томсона в углекислом газе представлена на рисунке 3. Основным элементом установки является трубка 1 с пористой перегородкой 2, через которую пропускается исследуемый газ. Трубка имеет длину 80 мм и сделана из нержавеющей стали, обладающей, как известно, малой теплопроводностью. Диаметр трубки $d = 3$ мм, толщина стенок 0,2 мм. Пористая перегородка расположена в конце трубки и представляет собой стеклянную пористую пробку со множеством узких и длинных каналов. Пористость и толщина пробки ($l = 5$ мм) подобраны так, чтобы обеспечить оптимальный поток газа при перепаде давлений $\Delta P = 4$ атм (расход газа составляет около 10 см³/с); при этом в результате эффекта Джоуля-Томсона создается достаточная разность температур.

Углекислый газ под повышенным давлением поступает в трубку через змеевик 5 из балластного баллона 6. Медный змеевик омывается водой и нагревает медленно протекающий



Давление газа в трубке измеряется манометром М и регулируется вентилем В (при открытии вентиля В, т. е. при повороте ручки против часовой стрелки, давление P_1 повышается). Манометр М измеряет разность между давлением внутри трубки и наружным (атмосферным) давлением. Так как углекислый газ после пористой перегородки выходит в область с атмосферным давлением P_2 , то этот манометр непосредственно измеряет перепад давления на входе и на выходе трубки $\Delta P = P_1 - P_2$.

Разность температур газа до перегородки и после нее измеряется дифференциальной термомпарой медь – константан. Константановая проволока диаметром 0,1 мм соединяет спаи 8 и 9, а медные проволоки (того же диаметра) подсоединены к цифровому вольтметру 7. Отвод тепла через проволоку столь малого сечения пренебрежимо мал. Для уменьшения теплоотвода трубка с пористой перегородкой помещена в трубу Дьюара 3, стенки которой посеребренны, для уменьшения теплоотдачи, связанной с излучением. Для уменьшения теплоотдачи за счет конвекции один конец трубы Дьюара уплотнен кольцом 4, а другой закрыт пробкой 10 из пенопласта. Такая пробка практически не создает перепада давлений между внутренней полостью трубы и атмосферой.

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 $T_1 = 17\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 30\text{ }^\circ\text{C}$, $T_3 = 40\text{ }^\circ\text{C}$, $T_4 = 50\text{ }^\circ\text{C}$. 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
6. Найдем коэффициенты Джоуля-Томсона методом наименьших квадратов. Погрешности рассчитаем по формулам:

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

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

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

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

T , $^\circ\text{C}$	T^{-1} , 10^{-3} K^{-1}	μ , 10^{-5} K/Па	σ_{μ} , 10^{-5} K/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 $\mu(T)$

8. По графику 2 и с помощью формулы 8 найдем a и b

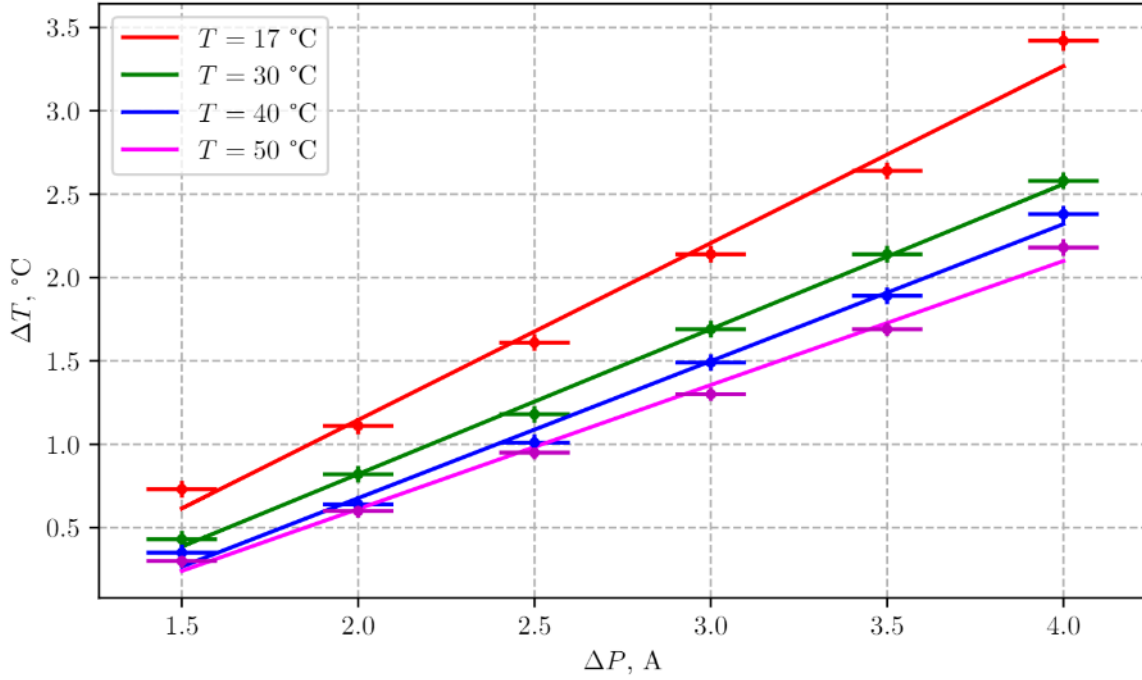


Рис. 2: График зависимости $\Delta T(P)$

$$a = \frac{(\mu_1 - \mu_2) C_P R T_1 T_2}{2 (T_2 - T_1)},$$

$$b = \frac{C_P (\mu_2 T_2 - \mu_1 T_1)}{T_1 - T_2}.$$

Погрешности этих вычислений можно оценить используя следующие формулы:

$$\sigma_a = a \sqrt{\varepsilon_{\mu_1 - \mu_2}^2 + \varepsilon_{T_1}^2 + \varepsilon_{T_2}^2 + \varepsilon_{T_2 - T_1}^2},$$

$$\sigma_b = b \sqrt{\varepsilon_{\mu_2 T_2 - \mu_1 T_1}^2 + \varepsilon_{T_1 - T_2}^2},$$

где

$$\sigma_{x \pm y} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}.$$

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

Таблица 3: Коэффициенты Ван-дер-Ваальса

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

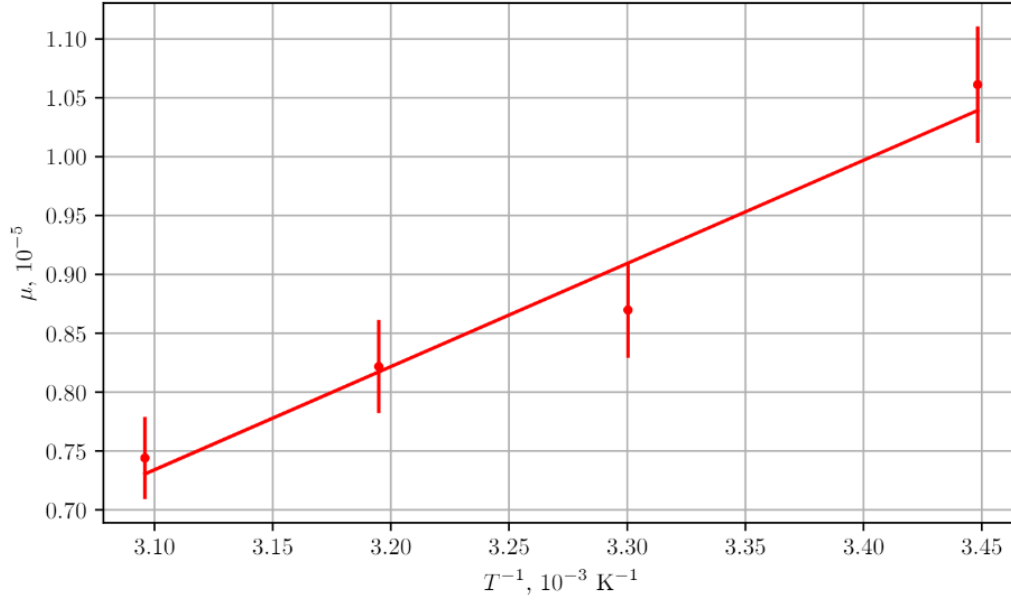


Рис. 3: График зависимости $\mu(T^{-1})$

4 Вывод

В ходе работы мы выявили экспериментально наличие эффекта Джоуля-Томсона, графики зависимости $\Delta T(P)$ имеют линейный вид согласно теории. Были вычислены коэффициенты a и b

$$a = (1.06 \pm 0.14) \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{К} \cdot \text{моль}^2} \quad (13)$$

$$b = (5.77 \pm 0.75) 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}} \quad (14)$$

$$a_{\text{табл}} = 0.36 \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{К} \cdot \text{моль}^2} \quad (15)$$

$$b_{\text{табл}} = (0.43 * 10^{-4}) \frac{\text{м}^3}{\text{моль}} \quad (16)$$

Полученные значения отличаются от табличных на порядок, но это связано с тем, что табличные данные соответствуют критической температуры. Наша отлична от нее. Также стоит отметить, что полученные значения отличаются от табличных в связи с тем, что модель Ван-дер-Ваальса не описывает реальный газ абсолютно точно.