Лабораторная работа 2.1.6. Эффект Джоуля-Томпсона

Калинин Даниил, Б01-110

19 мая 2022 г.

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.

Экспериментальная установка:

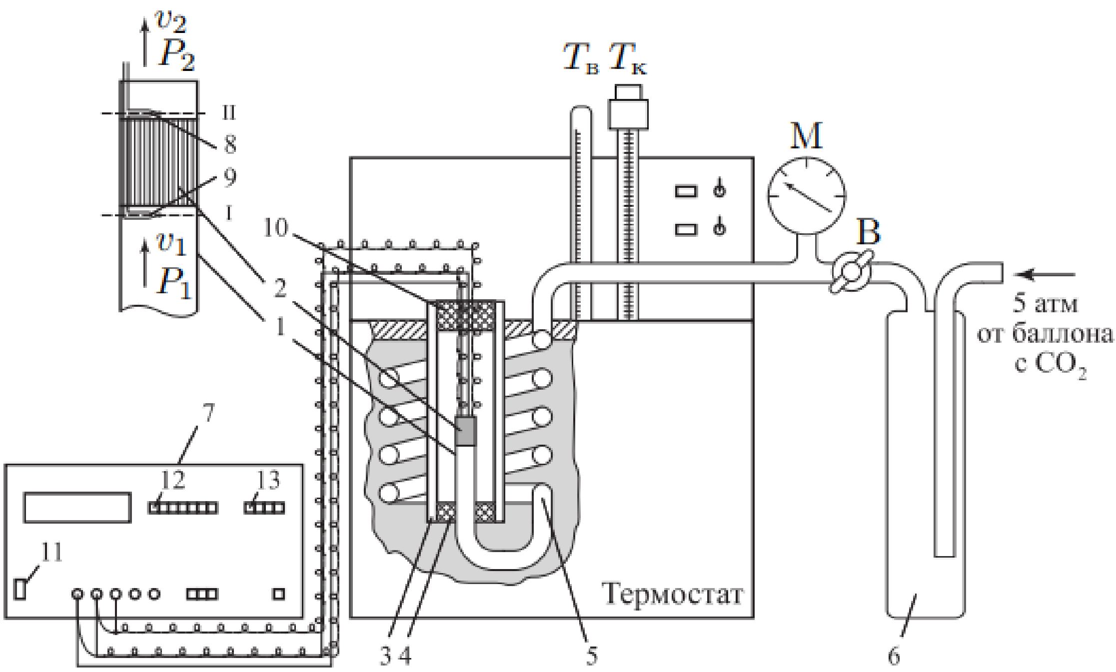

Рис. 1. *Установка, на которой проводился эксперимент*

Теоритическая справка:
Эффектом Джоуля–Томсона называется изменение температуры газа, медленно протекающего из области высокого в область низкого давления в условиях хорошей тепловой изоляции.

Рассмотрим стационарный поток газа между произвольными сечениями I и II трубки (до перегородки и после неё). Пусть, для определённости, через трубку прошёл 1 моль углекислого газа; μ — его молярная масса. Молярные объёмы газа, его давления и отнесённые к молю внутренние энергии газа в сечениях I и II обозначим соответственно V_1, P_1, U_1 и V_2, P_2, U_2. Для того чтобы ввести в трубку объём V_1, над газом нужно совершить работу $A_1 = P_1V_1$. Проходя через сечение II, газ сам совершает работу $A_2 = P_2V_2$. Так как через боковые стенки не происходит ни обмена теплом, ни передачи механической энергии, то

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

В уравнении (1) учтено изменение как внутренней (первые члены в скобках), так и кинетической (вторые члены в скобках) энергии газа. Подставляя в (1) написанные выражения для A_1 и A_2 и перегруппировывая члены, найдём:

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

$$\mu_{\partial-m} = \frac{\Delta T}{\Delta P} \approx \frac{\frac{2a}{RT} - b}{C_P} \tag{3}$$

Из формулы (3) видно, что эффект Джоуля–Томсона для не очень плотного газа зависит от соотношения величин a и b, которые оказывают противоположное влияние на знак эффекта. Если силы взаимодействия между молекулами велики, так что превалирует «поправка на давление», то основную роль играет член, содержащий a, и

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} > 0$$

т. е. газ при расширении охлаждается ($\Delta T < 0$, так как всегда $\Delta P < 0$). В обратном случае (малые a)

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} < 0$$

т.е. газ нагревается ($\Delta T > 0$, так как по-прежнему $\Delta P < 0$)

$$T_{инв} = \frac{27}{4}T_{кр.} \tag{4}$$

При температуре $T_{инв}$ эффект Джоуля–Томсона меняет знак: ниже температуры инверсии эффект положителен ($\mu_{\partial-m} > 0$, газ охлаждается), выше $T_{инв}$ эффект отрицателен ($\mu_{\partial-m} < 0$, газ нагревается).

Заменяя в формуле (2) U через C_V, T и PV через RT , найдём:

$$(R + C_v)(T_1 - T_2) = \mu\frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2},$$
$$\Delta T = \frac{\mu}{2C_p}\left(v_2^2 - v_1^2\right)$$

В условиях нашего опыта расход газа Q на выходе из пористой перегородки не превышает 10 $см^3/с$, а диаметр трубки равен 3 мм. Поэтому

$$u_2 \leq \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 10\ см^3/с}{3.14 \cdot (0.3)^2\ см^2} \approx 140\ см/с$$

Скорость v_1 газа у входа в пробку относится к скорости v_2 у выхода из неё как давление P_2 относится к давлению P_1. В нашей установке $P_1 = 4$ атм, а $P_2 = 1$ атм, поэтому

$$u_1 = \frac{P_2}{P_1} v_2 = \frac{1\ атм}{4\ атм} \cdot 140\ см/с = 35\ см/с$$

$$\Delta T = \frac{\mu}{2C_p}\left(v_2^2 - v_1^2\right) = \frac{44 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 40}\left(1.4^2 - 0.35^2\right) = 7 \cdot 10^{-4}\ K$$

Это изменение температуры ничтожно мало по сравнению с измеряемым эффектом (несколько градусов).

Ход работы:
1. Для начала запишем погрешности:

1. $\sigma_p = 0.05\ атм.$
2. $\sigma_U = 0.5\ мкВ.$

2. Включаем термостат, устанавливаем температуру $22.8°C$. Открываем вентиль так, чтобы избыточное давление было примерно 4 атм., ждём установления равновесия (1.5-2 минуты) записываем показания вольтметра в таблицу, далее проделываем аналогичные операции при избыточном давлении примерно 3.4, 3, 2.5, 2, результаты записываем в таблицу. Далее полученные значения напряжения переводим в значения температуры согласно таблице, указанной в описании работы.

3. Строим график зависимости $\Delta P(\Delta P)$, при помощи МНК находим коэффициент угла наклона графика, рассчитываем погрешность полученного значения. Проделываем действия пп.1-2 для температур в диапазоне 20-60 $°C$ с интервалом 10-20 $°C$. Результаты занесем в таблицы 1, 2 и 3.

$T = 22.8°C$		
ΔP, атм.	Напряжение, мкВ.	ΔT, $°C$
4	164.00	3.79
3.4	140.00	3.23
3	114.00	2.63
2.5	91.00	2.10
2	68.00	1.57

Таблица 1. Изменение температуры при различных давлениях, при начальной температуре $T = 22.8°C$

4. По полученным данным построим графики зависимости $\Delta T\,(\Delta P)$. Графики изображены на рисунках 2, 3 и 4.

5. По углу наклона графиков расчитаем коэффициент $\mu_{\partial - m}$ и погрешность его вычисления для каждой температуры, воспользовавшись формулами:

$T = 30°C$		
ΔP, атм.	Напряжение, мкВ.	$\Delta T,\ °C$
4	162.00	3.98
3.4	135.00	3.32
3	110.00	2.70
2.5	88.00	2.16
2	64.00	1.57

Таблица 2. Изменение температуры при различных давлениях, при начальной температуре $T = 30°C$

$T = 50°C$		
ΔP, атм.	Напряжение, мкВ.	$\Delta T,\ °C$
4	166.00	3.99
3.4	136.00	3.27
3	106.00	2.55
2.5	82.00	1.97
2	58.00	1.39

Таблица 3. Изменение температуры при различных давлениях, при начальной температуре $T = 50°C$

$$\mu_{\partial-m} = \frac{d\,(\Delta P)}{d\,(\Delta T)}$$

$$\varepsilon_{mu} = \sqrt{\varepsilon_u^2 + \varepsilon_P^2}$$

Результаты занесем в таблицу 4.

$T,\ °C.$	μ, К/атм.	$\varepsilon_{mu},\ \%$
22.8	1.13	1.73
30	1.22	1.74
50	1.32	1.74

Таблица 4. коэффициент $\mu_{\partial-m}$ для разных температур

6. Теперь построим график $\mu\,(1/T)$. Восстановим прямую, воспользовавшись методом МНК. График изобразим на рисунке 5

7. Воспользовавшись следующими формулами, рассчитаем коэффициенты в уравнении Ван-дер-Ваальса для исследуемого газа.

$$a = \frac{d\,(\mu_{\partial-m})}{d\,(1/T)} C_p \frac{R}{2} = 0.95\ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{моль}^2}$$

$$b = -BC_p = 1186\ \frac{\text{см}^3}{\text{моль}}$$

$$\varepsilon_a = \sqrt{\varepsilon_\mu^2 + \varepsilon_T^2} = 7\%$$

$$\varepsilon_b = \varepsilon_B \overset{\text{из МНК}}{=} 2.5\%$$

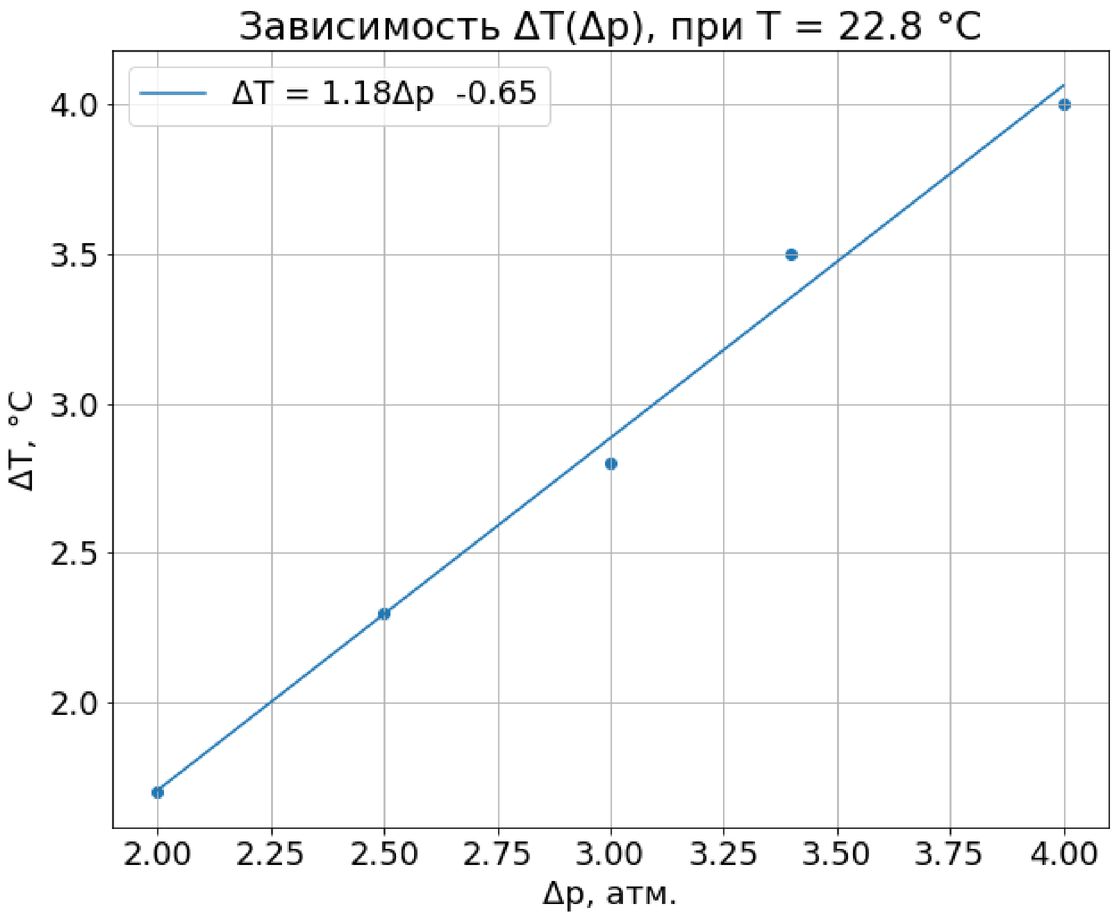

Рис. 2. *График зависимости* $\Delta T\,(\Delta P)$ *для температуры* $T = 22.8°C$.

Заключение:
В ходе работы были получены коэффициенты Джоуля-Томпсона при различных температурах, также была получена зависимость коэффициента Джоуля-Томпсона от температуры.

Были рассчитаны коэффициенты Ван-дер-Вальса для исследуемого газа. Отметим, что полученные значения не совпадают с табличными даже с учётом погрешности, что говорит о неприменимости в данных условиях модели газа Ван-дер-Вальса.

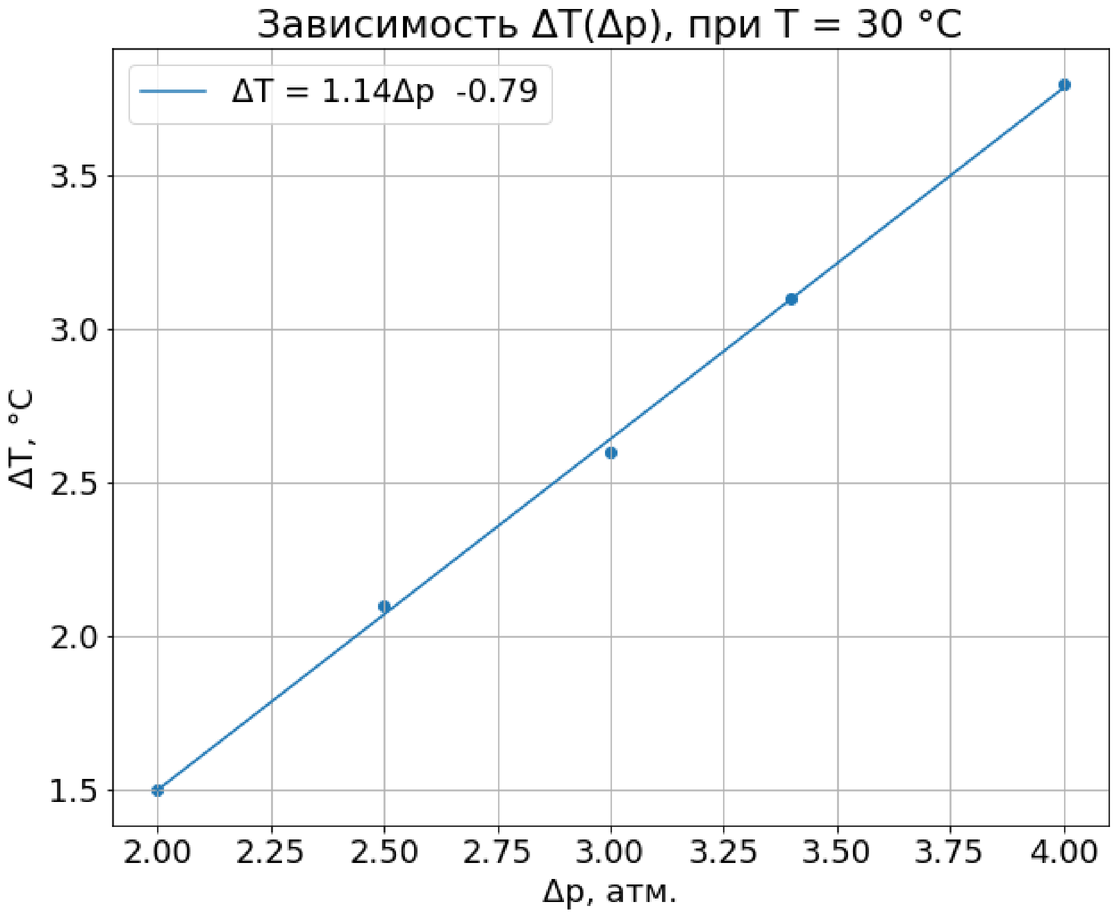

Рис. 3. *График зависимости* $\Delta T\,(\Delta P)$ *для температуры* $T = 30°C$.

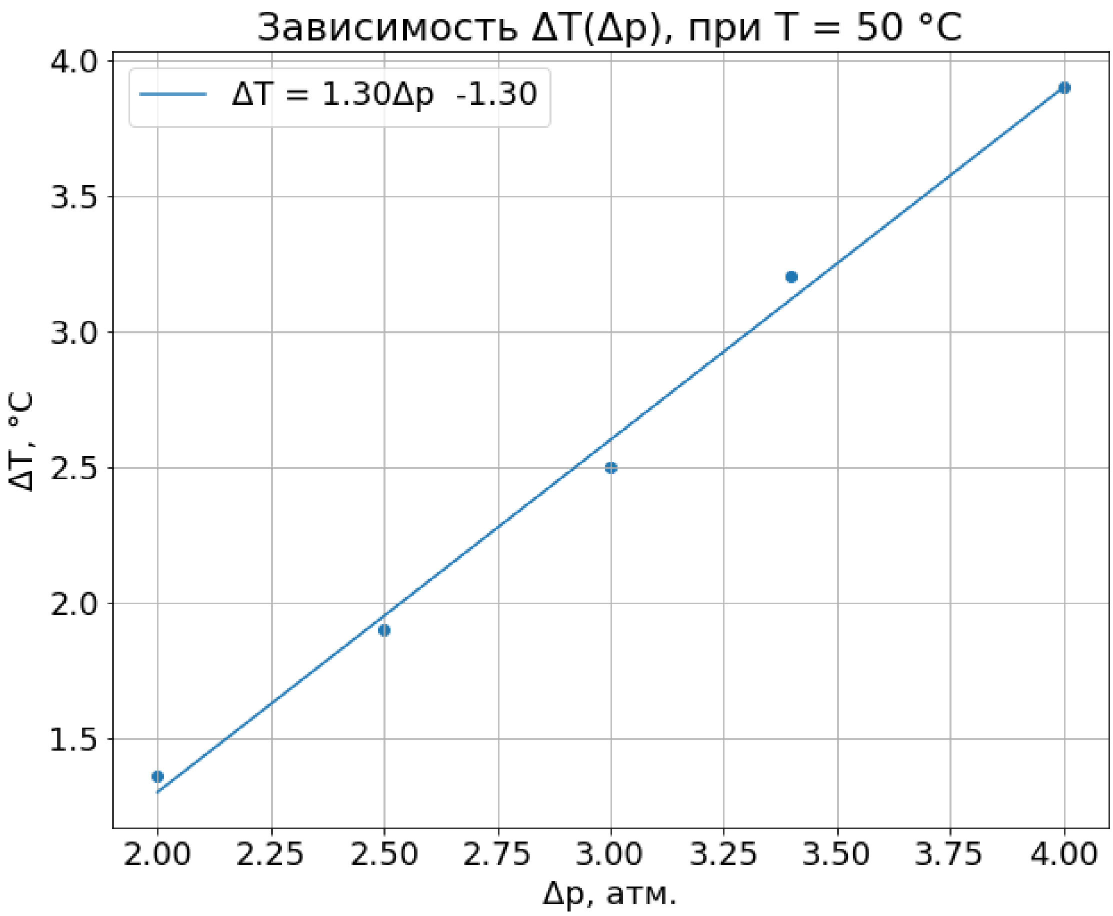

Рис. 4. *График зависимости* $\Delta T\,(\Delta P)$ *для температуры* $T = 30°C$.

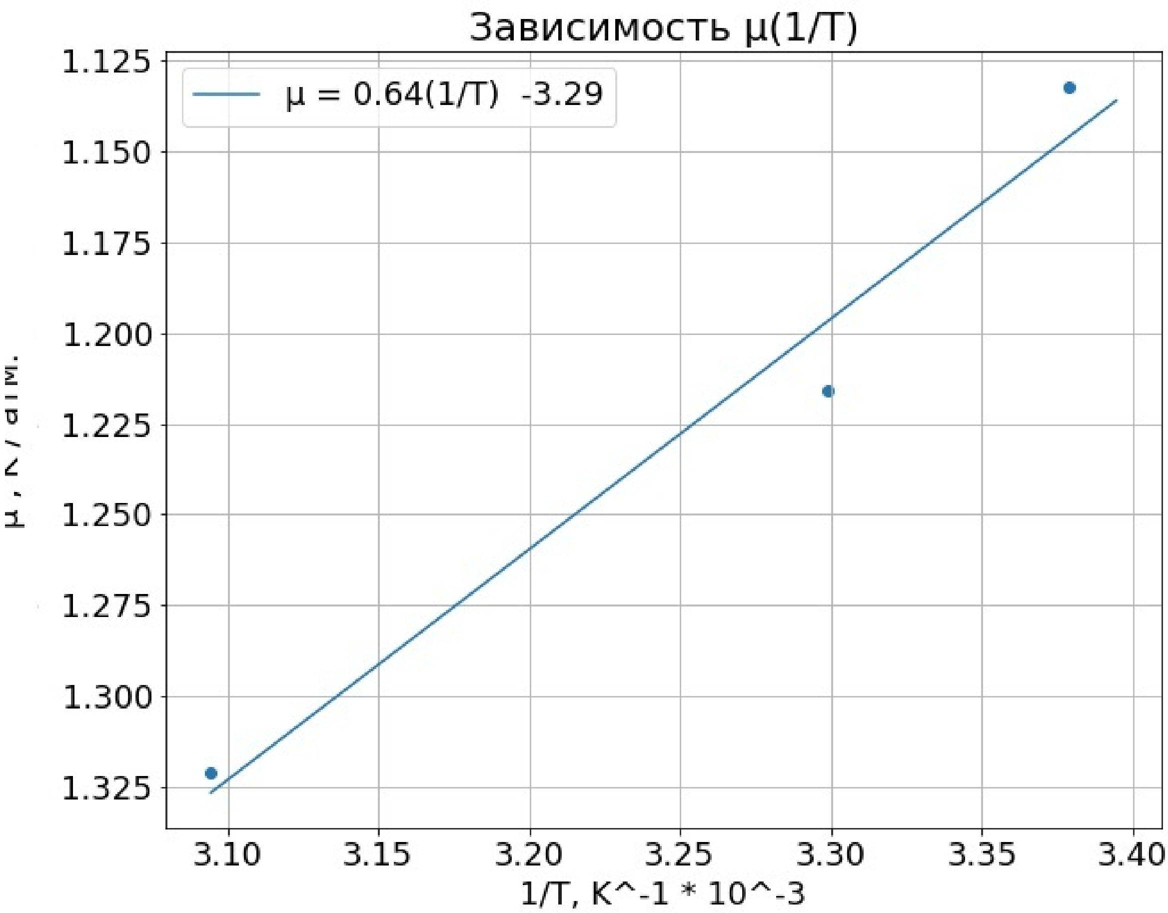

Рис. 5. График зависимости $\mu\,(1/T)$.