

Лабораторная работа 2.1.6

Эффект Джоуля–Томсона

Татаурова Юлия Романовна

12 марта 2024 г.

Цель работы:

- 1) определить изменения температуры углекислого газа при протекании через малопроницаемую перегородку при разных начальных значениях давления и температуры;
- 2) вычислить по результатам опытов коэффициенты и модели Ван-дер-Ваальса.

Оборудование: трубка с пористой перегородкой; труба Дьюара; термостат жидкостной; дифференциальная термопара; вольтметр универсальный (мультиметр); балластный баллон; манометр.

Теоретические сведения

Эффектом Джоуля–Томсона называется изменение температуры газа, медленно просачивающегося из области высокого в область низкого давления в условиях тепловой изоляции. Коэффициентом Джоуля–Томсона называется величина:

$$\mu_{\text{Д-Т}} = \frac{\Delta T}{\Delta P} \quad (1)$$

Выведем некоторые теоретические соотношения:

$$Q = 0 \rightarrow \delta A = -\Delta U \rightarrow P_1 V_1 - P_2 V_2 = (U_2 + \frac{\mu v_2^2}{2}) - (U_1 + \frac{\mu v_1^2}{2})$$

Молярная энтальпия: $H = U + PV$, тогда

$$H_1 - H_2 = \frac{\mu(v_2^2 - v_1^2)}{2}$$

Однако кинетическая энергия газа оказывается пренебрежимо малой, поэтому

$$H_1 \approx H_2$$

Рассмотрим реальный газ как газ Ван-дер-Ваальса:

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

$$U = C_v T - \frac{a}{V}$$

Тогда энтальпия:

$$H = U + PV = C_v T + RT \frac{V}{V-a} - \frac{2a}{V} \quad (2)$$

При этом для упрощения вычислений будем считать газ разряженным и считать объем по формуле Клайперона-Менделеева $V \approx \frac{RT}{P}$, а также с учетом того, что $b \ll V$ из 2 получаем:

$$H \approx C_p T + P \left(b - \frac{2a}{RT} \right) \quad (3)$$

Так же будем считать изменения температуры в опыте небольшим $\frac{\Delta T}{T} \ll 1$. Тогда полагая $\Delta H = 0$ из 3:

$$\mu_{д-т} = \frac{\Delta T}{\Delta P} \approx - \frac{b - \frac{2a}{RT}}{C_p} \quad (4)$$

Из 4 видно, что существует такая температура (*температура инверсии*), при которой знак эффекта меняется:

$$T_{инв} = \frac{2a}{Rb} \quad (5)$$

Экспериментальная установка

Схема установки для исследования эффектов Джоуля-Томсона в углекислом газе представлена на ниже.

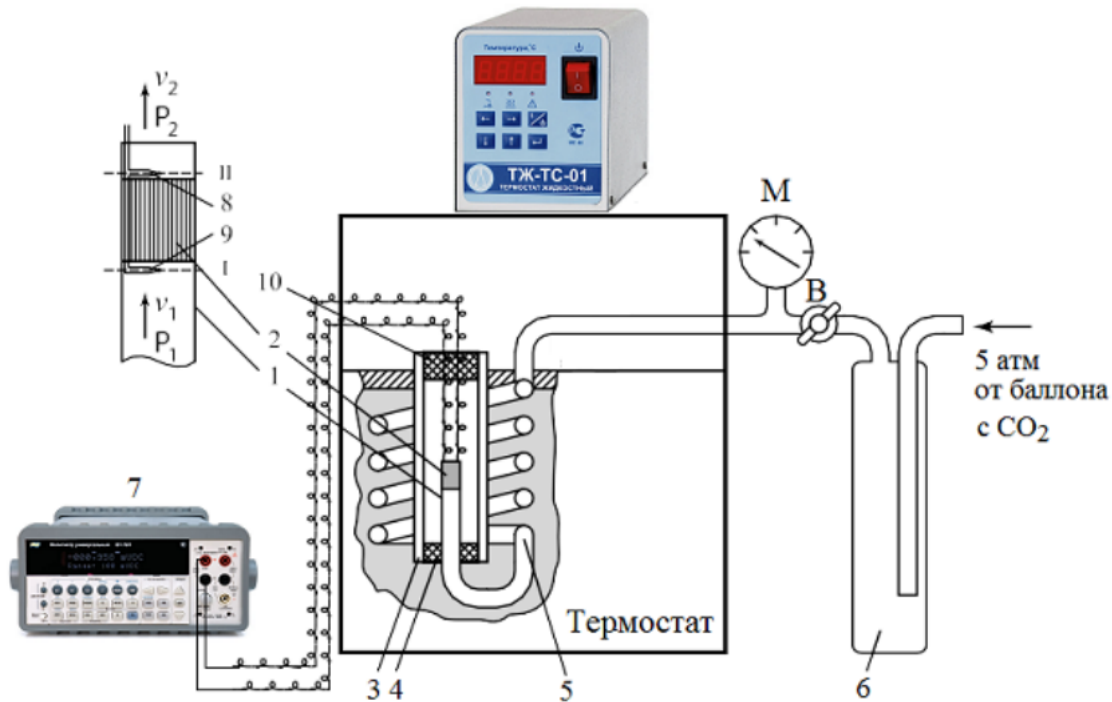


Рис. 1: Экспериментальная установка для исследования эффектов Джоуля-Томсона

Через турбку 1,сделанной из стали и потому обладающей малой теплопроводностью и содержащей на конце пористую перегородку 2, пропускается исследуемый газ - двуокись углерода CO_2 . Углекислый газ под повышенным давлением попадает в трубку через змеевик 5 из баллона 6. Змеевик в свое время медленно нагревает проходящий через него газ до температуры воды в термостате, который поддерживает ее постоянной с точностью $\pm 0.1^\circ C$. Манометр М измеряет разность давлений внутри трубки и снаружи. Разность температур газа до и после перегородки измеряется дифференциальной термопарой медь-констант, концы которой подключены к вольтметру. Если концы термопары имеют разную температуру, то в цепи возникает разность потенциалов, которая и измеряется вольтметром.

Экспериментальные данные

| $\sigma_{\text{ман}}$, Бар | $max_{\text{ман}}$, Бар | ΔV , мкВ | C_p , кДж/(кг·К) |
|-----------------------------|--------------------------|------------------|--------------------|
| 0.1 | 6 | 1 | 0.846 |

Таблица 1: Некоторые константы и погрешности приборов

| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ΔP , Бар | 4 | 3.5 | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 1.5 |
| $\Delta T^\circ C (T = 23.3^\circ C)$ | -3.87 | -3.28 | -2.71 | -2.22 | -1.66 | -1.29 |
| $\Delta T^\circ C, (T = 30^\circ C)$ | -3.71 | -3.13 | -2.71 | -2.13 | -1.55 | -0.97 |
| $\Delta T^\circ C, (T = 40^\circ C)$ | -3.28 | -2.61 | -2.14 | -1.61 | -1.11 | -0.82 |
| $\Delta T^\circ C, (T = 50^\circ C)$ | -2.56 | -1.93 | -1.46 | -1.06 | -0.71 | -0.48 |

Таблица 2: Зависимость $\Delta P(\Delta T)$ при различных значениях T

По полученным данным были построены графики зависимости $\Delta P(\Delta T)$ и по ним вычислены значения $\mu_{\text{д-т}} = \frac{\Delta P}{\Delta T}$ для разных температур. Результаты и сравнение с табличными данными приведены ниже.

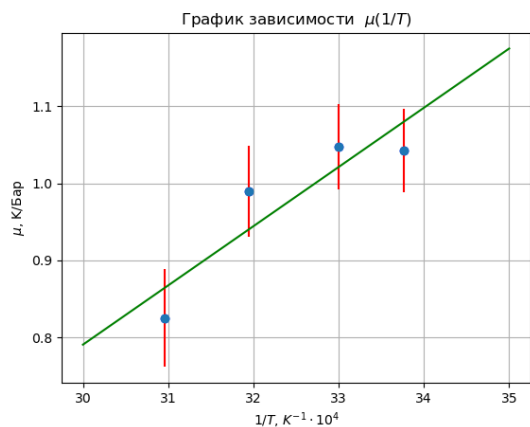
| $T^\circ C$ | 23 | 30 | 40 | 50 |
|------------------------------------|-------|-------|--------|--------|
| $ \mu_{\text{д-т}} $, К/бар (экс) | 1.043 | 1.048 | 0.9901 | 0.8251 |
| $\mu_{\text{д-т}}$, К/бар (табл) | 1.105 | 1.03 | 0.958 | 0.898 |

Таблица 3: Сравнение экспериментальных и табличных значений коэффициентов Джоуля-Томсона

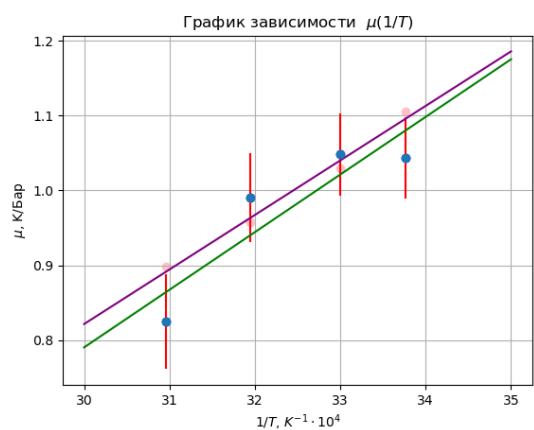
Погрешность рассчитывалась по формуле:

$$\sigma_p = 0.1 \text{ бар}; \sigma_v = 0.003 \text{ мВ} \quad (6)$$

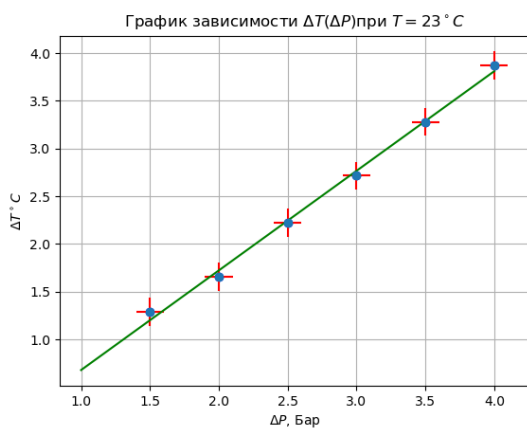
$$\varepsilon_\mu = \sqrt{\left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_P}{P}\right)^2}; \varepsilon_{\max} = 7.7\% \quad (7)$$



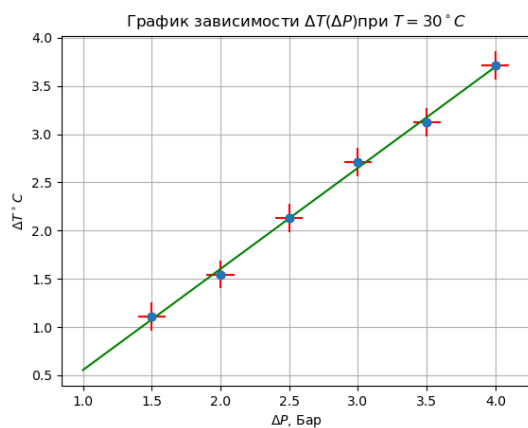
(a) График зависимости $\mu_{д-т}(\frac{1}{T})$



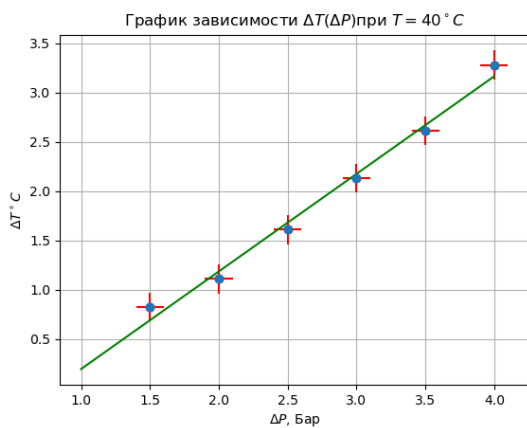
(b) Сравнение табличных и экспериментальных значений $\mu_{д-т}$



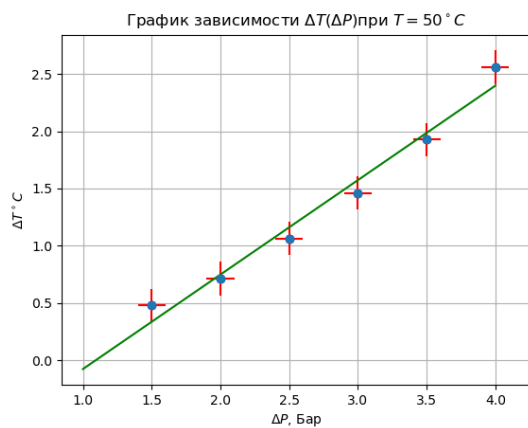
(a) $\Delta P(\Delta T)$ при $T = 23.3^\circ C$



(b) $\Delta P(\Delta T)$ при $T = 30^\circ C$



(c) $\Delta P(\Delta T)$ при $T = 40^\circ C$



(d) $\Delta P(\Delta T)$ при $T = 50^\circ C$

Вычисляя по формулам $a, b, T_{\text{инв}}$ получаем:

$$a = \frac{1}{2}\mu C_p R T = 0.0270 \pm 0.004 \text{ Н}\cdot\text{м}^4/\text{моль}^2; a_{\text{табл}} = 0.36 \text{ Н}\cdot\text{м}^4/\text{моль}^2 \quad (8)$$

$$b = \mu C_p = 12.8 \pm 0.9 \text{ см}^3/\text{моль}; b_{\text{табл}} = 42.7 \text{ см}^3/\text{моль} \quad (9)$$

$$T_{\text{инв}} = \frac{2a}{Rb} = 507 \pm 85 \text{ К}; T_{\text{табл}} = 1520 \text{ К} \quad (10)$$

Результаты и выводы