

# Работа 2.1.6

## Эффект Джоуля–Томсона

Малиновский Владимир

galqiwi@galqiwi.ru

**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.

### Описание работы

В этой работе наблюдается эффект Джоуля-Томсона при прохождении углекислого газа через пористую перегородку. Эффект представляет из себя изменение температуры газа на выходе из перегородки в связи с его неидеальностью. При малых перепадах давления можно считать, что энтальпия одного моля проходящего газа сохраняется, поскольку скорости на входе и выходе отличаются не сильно:

$$\Delta M = \frac{\mu}{2} v^2,$$

при том, что  $\Delta M$  – вклад скорости частиц в энтальпию. При диаметре трубки в 3мм и скорости потока порядка 10мл/с, скорость получается порядка  $\approx 1.4$  м/с. Это меняет разность температур не сильнее, чем на:

$$\Delta T = \Delta M C_p = \frac{\mu}{2C_p} v^2 \approx 0.5 \text{ мК},$$

что много меньше разности температур в эксперименте ( $\approx 1$  К). Если записать равенство энтальпий на границах перегородки и применить уравнение газа Ван-дер-Ваальса, можно получить связь между разницей давлений и температур:

$$\mu_{\text{Д-Т}} = \frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{2a/(RT) - b}{C_p},$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты газа Ван-дер-Ваальса. В этой работе планируется получить значения  $a$  и  $b$  из экспериментальной зависимости  $\mu_{\text{Д-Т}}$  от температуры и этой формулы.

Схема установки представлена на рис. 1:

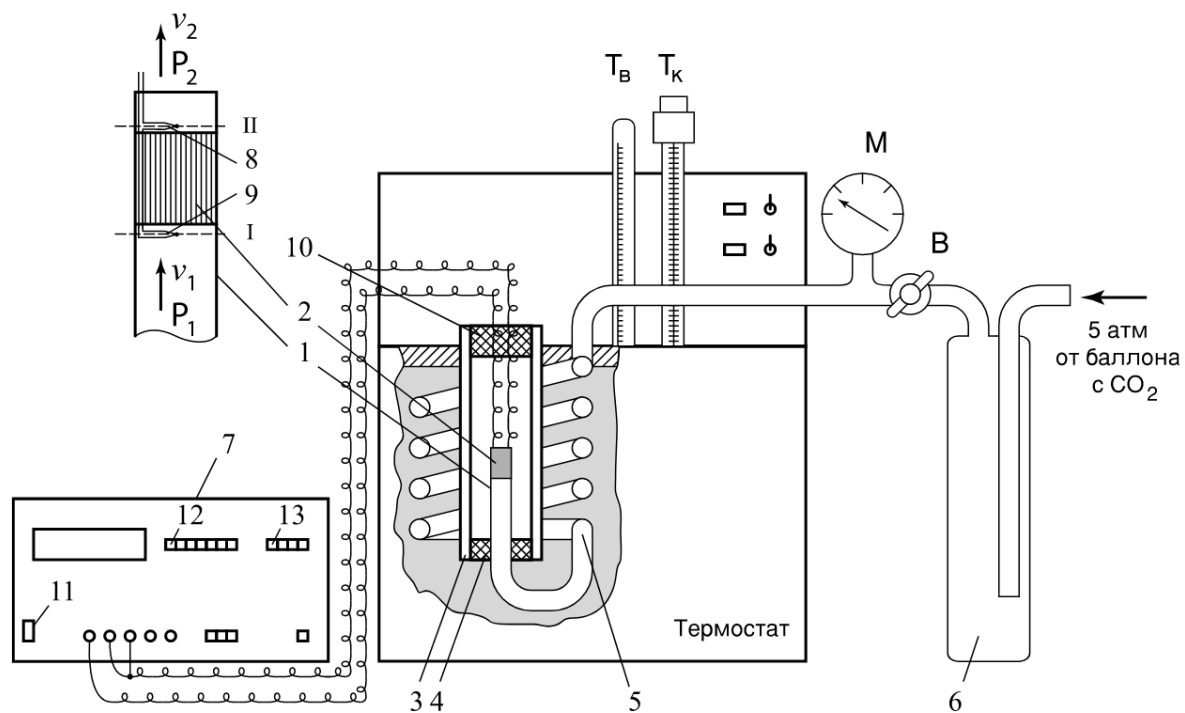


Рис. 1. Схема установки для изучения эффекта Джоуля–Томсона

1. трубка с пористой перегородкой (2)
2. пористая перегородка
3. труба Дьюара
4. кольцо
5. змеевик
6. балластный баллон
7. вольтметр
8. верхний спай термопары
9. нижний спай термопары
10. пробка из пенопласта

# Методика и результаты

## 1-2

## 3

Включим установку. Запишем начальное напряжение  $V_0$  на вольтметре при  $\Delta P = 0$ . В дальнейшем будем учитывать это напряжение как сдвиг при измерении напряжения:

$$V = V_{\text{изм}} - V_0.$$

## 4-7

1. Проведем измерения на температуре  $T$ :  
Откроем вентиль так, чтобы избыточное давление в системе было  $\approx 4$  бар. Подождем 10 минут установления равновесия в системе.
2. начнем уменьшать давление. При каждом изменении давления, подождем 5 минут установления равновесия.
3. по МНК определим значение  $\mu = dT/dP = dT/dV \cdot dV/dP$ .

## 8-10

повторим прошлый пункт для температур от комнатной до  $60^\circ\text{C}$

$p$ , бар	$V$ , $\mu\text{B}$	$T$ , К
4.00	137.0	20.640
3.50	119.0	20.640
3.00	98.0	20.830
2.50	75.0	20.790
2.00	57.0	20.850

$p$ , бар	$V$ , $\mu\text{B}$	$T$ , К
4.00	131.0	29.340
3.50	112.0	29.570
3.00	92.0	29.710
2.50	73.0	29.680
2.00	52.0	29.680

$p$ , бар	$V$ , $\mu\text{B}$	$T$ , К
4.00	130.0	40.060
3.50	105.0	40.070
3.00	86.0	40.050
2.50	69.0	40.040
2.00	50.0	40.020

$p$ , бар	$V$ , $\mu\text{B}$	$T$ , К
4.00	115.0	50.000
3.50	101.0	50.010
3.00	81.0	50.030
2.50	66.0	50.040
2.00	53.0	50.030

$p$ , бар	$V$ , $\mu\text{B}$	$T$ , К
4.00	105.0	60.000
3.50	91.0	60.000
3.00	78.0	60.000
2.50	58.0	60.020
2.00	48.0	60.010

$$\Delta p = 0.05 \text{ бар}, \Delta V = 0.5 \mu\text{B}, \Delta T = 0.005 \text{ К}.$$

Учет приборной погрешности:

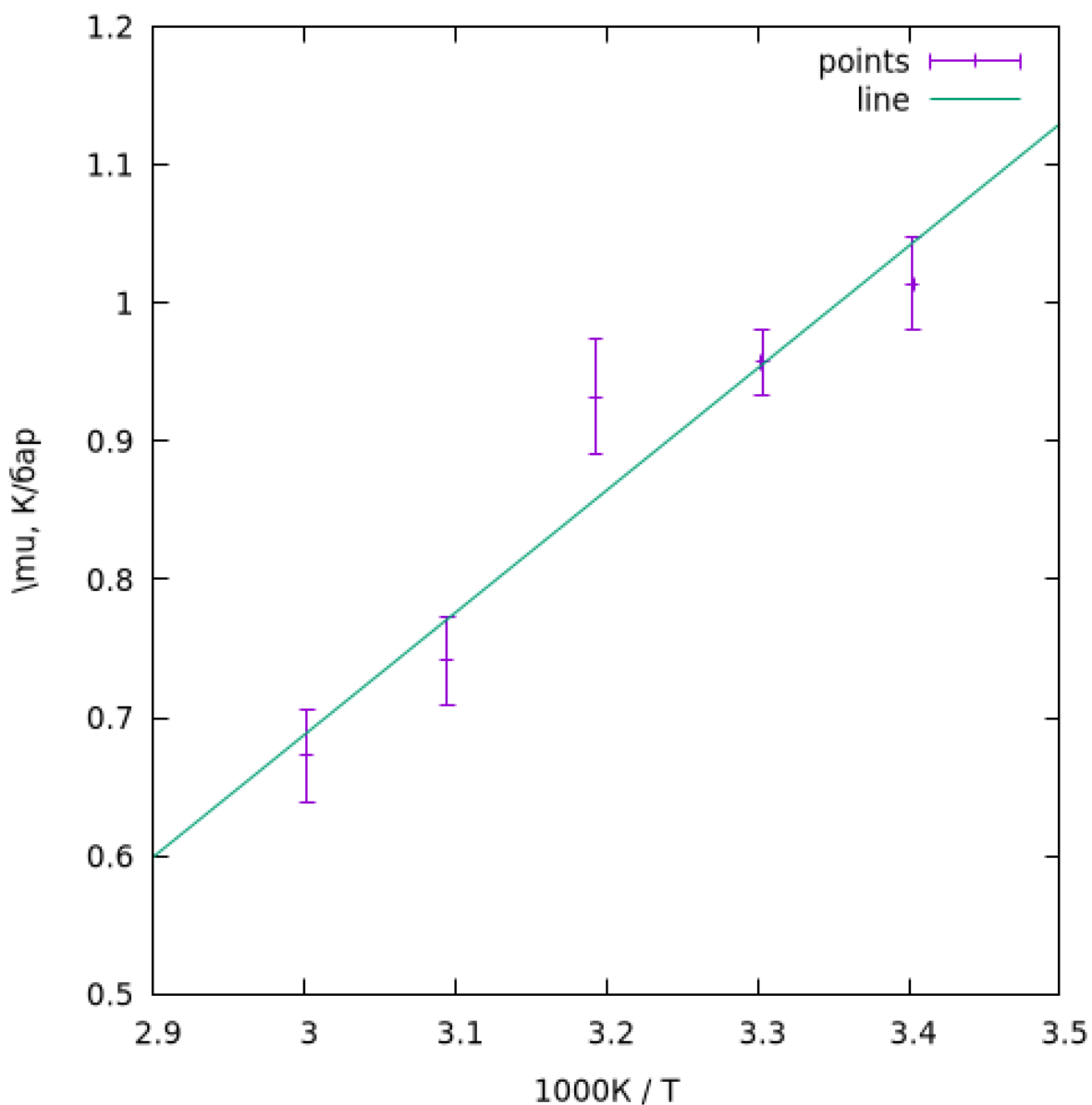
$$\delta(dV/dT) = \sqrt{\delta(dV/dT)_{\text{МНК}}^2 + \left(\frac{\sigma_V}{\langle V \rangle} + \frac{\sigma_T}{\langle T \rangle}\right)^2}.$$

Величины  $dV/dT$  брались как среднее арифметическое этой величины на участках, разделенных температурой, кратной десяти. Погрешность считалась половина соответствующего модуля разности.

$T, K$	$dV/dP, \mu B/\text{бар}$	$dV/dT, \mu B/K$	$\mu = dT/dP, K/\text{бар}$	$1000K/T$
$293.90 \pm 0.05$	$40.80 \pm 0.89$	$40.25 \pm 0.45$	$1.01 \pm 0.03$	$3.4025 \pm 0.0005$
$302.75 \pm 0.07$	$39.40 \pm 0.53$	$41.15 \pm 0.45$	$0.96 \pm 0.02$	$3.3031 \pm 0.0007$
$313.20 \pm 0.01$	$39.20 \pm 1.35$	$42.05 \pm 0.45$	$0.93 \pm 0.04$	$3.1929 \pm 0.0001$
$323.17 \pm 0.01$	$31.80 \pm 1.06$	$42.90 \pm 0.40$	$0.74 \pm 0.03$	$3.0943 \pm 0.0001$
$333.16 \pm 0.01$	$29.40 \pm 1.21$	$43.70 \pm 0.40$	$0.67 \pm 0.03$	$3.0016 \pm 0.0001$

## 11-13

Коэффициенты  $a$  и  $b$  можно получить, проанализировав линейную зависимость  $\mu$  от  $1/T$ , что мы и сделаем:



Из МНК следует, что

$$\mu = -(1.96 \pm 0.02) \frac{K}{\text{бар}} + (0.88 \pm 0.12) \frac{K}{\text{бар}} \cdot \frac{1000K}{T}.$$

Если учитывать погрешность линейного члена аналогично рассмотренной на странице раньше, а приборную погрешность постоянной добавки, как среднее арифметическое  $\sigma_\mu$ ,

то получатся коэффициенты:

$$\mu = -(1.96 \pm 0.07) \frac{\text{К}}{\text{бар}} + (0.88 \pm 0.15) \frac{\text{К}}{\text{бар}} \cdot \frac{1000\text{К}}{T}.$$

Найдем  $a$ ,  $b$ :

$$a = \frac{C_p R}{2} (880 \pm 120) \frac{\text{К}^2}{\text{бар}} = 2R^2 (880 \pm 120) \frac{\text{К}^2}{\text{бар}} = (1.2 \pm 0.2) \text{НМ}^4 / \text{моль}^2,$$

$$a_{\text{теор}} = 0.36 \text{НМ}^4 / \text{моль}^2.$$

$$b = C_p (1.96 \pm 0.07) \frac{\text{К}}{\text{бар}} = (650 \pm 20) \text{см}^3 / \text{моль}, \quad b_{\text{табл}} = 43 \text{см}^3 / \text{моль}.$$

$$T_{\text{инв}} = \frac{2a}{Rb} = (4.4 \pm 0.9) \cdot 10^2 \text{ К}, \quad T_{\text{инв|табл}} = 2.0 \text{кК}$$

## Вывод

Наша модель плохо описывает поведение системы, поскольку финальные коэффициенты не сошлись с табличными. Не смотря на это, они отличались от них меньше, чем в 20 раз, что не так плохо. Мы измерили изменение температуры углекислого газа при протекании через перегородку при различных давлениях и температурах и вычислили значения коэффициентов Ван-дер-Ваальса и температуры инверсии, хоть и не точно.