

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 ΔM – вклад скорости частиц в энтальпию. При диаметре трубки в 3 мм и скорости потока порядка 10 мл/с, скорость получается порядка ≈ 1.4 м/с. Это меняет разность температур не сильнее, чем на:

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

что много меньше разности температур в эксперименте (≈ 1 К).

Если записать равенство энтальпий на границах перегородки и применить уравнение газа Ван-дер-Ваальса, можно получить связь между разницей давлений и температур:

$$\mu_{\text{д-т}} = \frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{(2a/RT) - b}{C_p}.$$

Схема установки представлена на рис. 1:

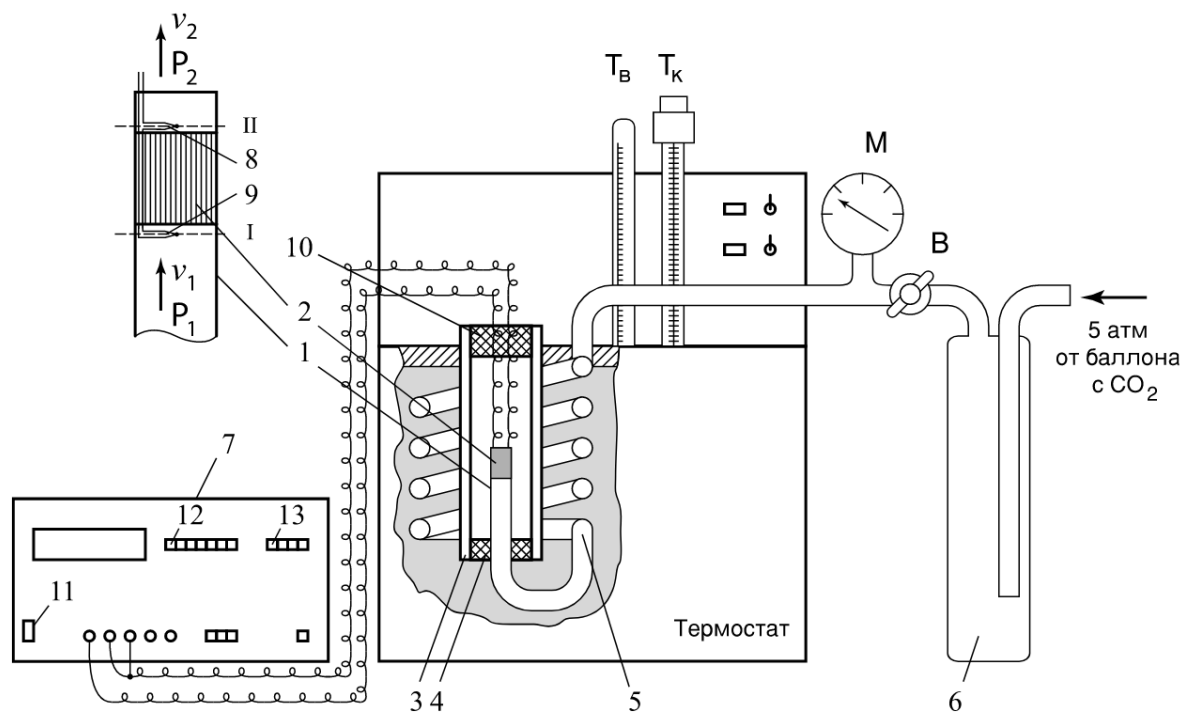


Рис. 1. Схема установки для изучения эффекта Джоуля–Томсона

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

Результаты и обработка

В этом эксперименте проведены серии по 5 точек зависимости V – напряжения на термопаре от P – давления на выходе из баллона при 5 различных температурах. Для каждой серии по методу наименьших квадратов была рассчитана величина $\mu_{д-т} = \frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{\Delta V}{\Delta P} / \frac{\Delta V}{\Delta T}$.

p , бар	V , $\mu\text{В}$	T , К
4.00 ± 0.05	137.0 ± 0.5	20.640 ± 0.005
3.50 ± 0.05	119.0 ± 0.5	20.640 ± 0.005
3.00 ± 0.05	98.0 ± 0.5	20.830 ± 0.005
2.50 ± 0.05	75.0 ± 0.5	20.790 ± 0.005
2.00 ± 0.05	57.0 ± 0.5	20.850 ± 0.005

p , бар	V , $\mu\text{В}$	T , К
4.00 ± 0.05	131.0 ± 0.5	29.340 ± 0.005
3.50 ± 0.05	112.0 ± 0.5	29.570 ± 0.005
3.00 ± 0.05	92.0 ± 0.5	29.710 ± 0.005
2.50 ± 0.05	73.0 ± 0.5	29.680 ± 0.005
2.00 ± 0.05	52.0 ± 0.5	29.680 ± 0.005

p , бар	V , $\mu\text{В}$	T , К
4.00 ± 0.05	130.0 ± 0.5	40.060 ± 0.005
3.50 ± 0.05	105.0 ± 0.5	40.070 ± 0.005
3.00 ± 0.05	86.0 ± 0.5	40.050 ± 0.005
2.50 ± 0.05	69.0 ± 0.5	40.040 ± 0.005
2.00 ± 0.05	50.0 ± 0.5	40.020 ± 0.005

p , бар	V , $\mu\text{В}$	T , К
4.00 ± 0.05	115.0 ± 0.5	50.000 ± 0.005
3.50 ± 0.05	101.0 ± 0.5	50.010 ± 0.005
3.00 ± 0.05	81.0 ± 0.5	50.030 ± 0.005
2.50 ± 0.05	66.0 ± 0.5	50.040 ± 0.005
2.00 ± 0.05	53.0 ± 0.5	50.030 ± 0.005

p , бар	V , $\mu\text{В}$	T , К
4.00 ± 0.05	105.0 ± 0.5	60.000 ± 0.005
3.50 ± 0.05	91.0 ± 0.5	60.000 ± 0.005
3.00 ± 0.05	78.0 ± 0.5	60.000 ± 0.005
2.50 ± 0.05	58.0 ± 0.5	60.020 ± 0.005
2.00 ± 0.05	48.0 ± 0.5	60.010 ± 0.005

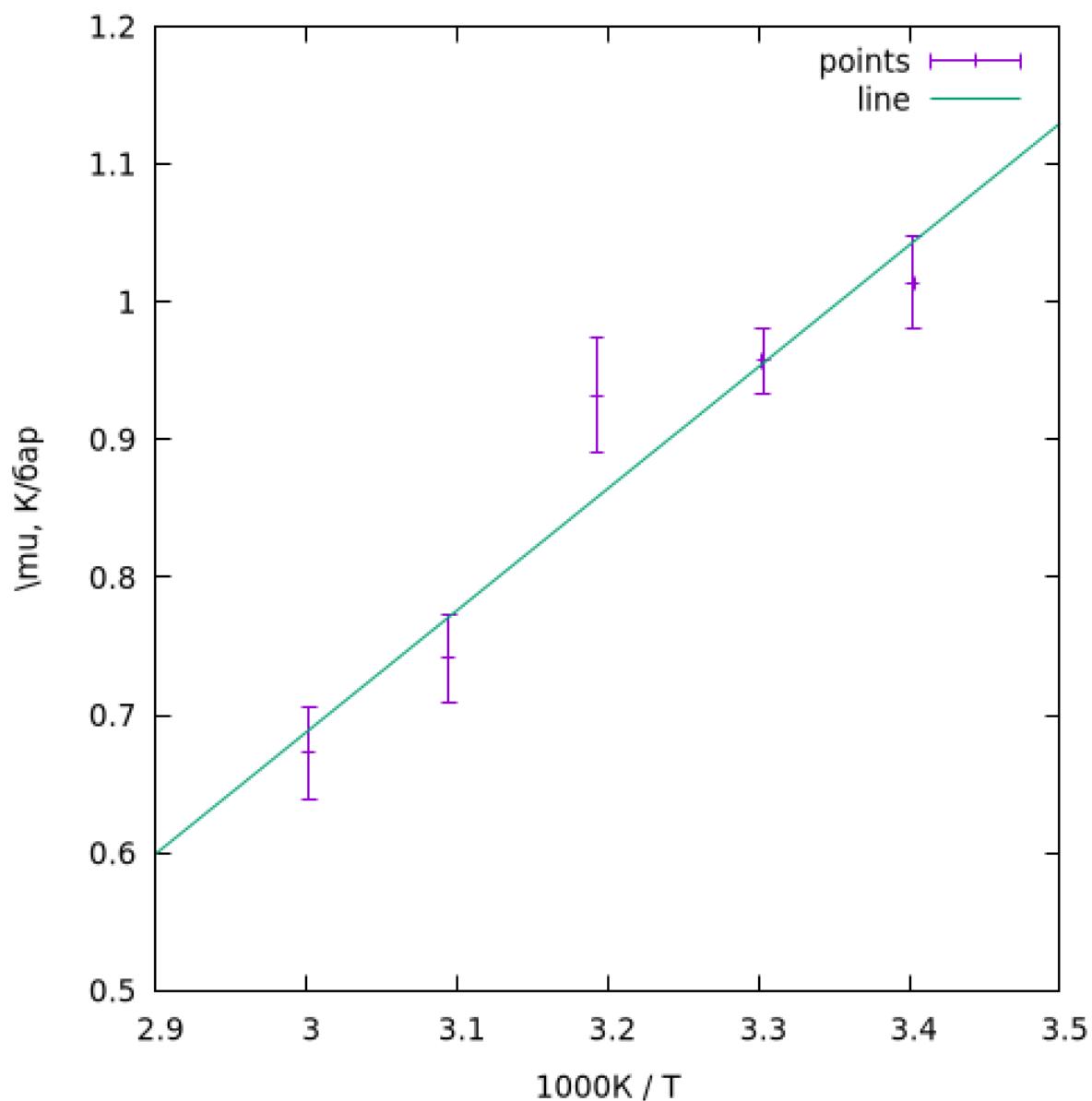
Из МНК можно найти dV/dT для каждой из температур. Приборная погрешность (для получения полной, суммируются квадраты со статистической погрешностью и берется корень) для dV/dT считается, как

$$\sigma(dV/dT) = (dV/dT) \left(\frac{\sigma_V}{\langle V \rangle} + \frac{\sigma_T}{\langle T \rangle} \right).$$

Величины dV/dT для температур в цельсиях близких к кратным десяти брались как среднее арифметическое этой величины на граничных участках. Погрешность считалась, как половина соответствующих модулей разности.

Величина μ рассчитывалась как отношение dV/dP к dV/dT с соответствующей погрешностью.

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



Из МНК следует, что

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

Если учитывать погрешность линейного члена аналогично рассмотренной на странице раньше, а приборную погрешность постоянной добавки как среднее арифметическое σ_μ , то получатся коэффициенты

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

Найдем a , b .

$$a = \frac{C_p R}{2} (880 \pm 120) \frac{\text{K}^2}{\text{бар}} = 2R^2 (880 \pm 120) \frac{\text{K}^2}{\text{бар}} = (1.2 \pm 0.2) \text{Н м}^4 / \text{моль}^2, a_{\text{табл}} = 0.36 \text{Н м}^4 / \text{моль}^2$$

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

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, хоть и не точно.