

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Факультет общей и прикладной физики

Отчет о выполнении работы 2.1.6. Эффект Джоуля—Томсона

Выполнил:
Студент гр. Б02-304
Головинов. Г.А.



Долгопрудный, 2024

Аннотация

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 a и b модели Ван-дер-Ваальса.

В работе используются: трубка с пористой перегородкой; труба Дьюара; термостат жидкостный; дифференциальная термopара; мультиметр; балластный баллон; манометр.

1 Основные теоретические сведения

Эффектом Джоуля—Томсона называется изменение температуры газа, просачивающегося из области высокого в область низкого давления в условиях тепловой изоляции. В разреженных газах (практически идеальных) при таком течении температура не меняется.

В работе газ из области повышенного давления p_1 проходит через множество узких и длинных каналов пористой перегородки в область с атмосферным давлением p_2 . Перепад давления $|\Delta p| = p_1 - p_2$ из-за большого сопротивления перегородки может быть заметным даже при малой скорости течения газа. Величина эффекта определяется по разности температур газа ΔT до и после перегородки.

Вывод эффекта Джоуля—Томсона. Пусть через трубку прошел $\Delta \nu = 1$ моль газа, пусть V_1 и V_2 — молярные объемы газа до и после, p_1 , p_2 — соответствующие давления. U_1 , U_2 — внутренние энергии в расчете на 1 mol. Для того чтобы ввести в трубку порцию газа объемом V_1 необходимо совершить работу $A_1 = p_1 V_1$. Выходя из трубки эта же порция совершает работу $A_2 = p_2 V_2$. Считая, что стенки не проводят тепло и не совершается механической передачи энергии, получаем:

$$\begin{aligned} A_1 - A_2 &= p_1 V_1 - p_2 V_2 = \\ &= (U_2 + \mu v_2^2/2) - (U_1 + \mu v_1^2/2) \end{aligned} \quad (1)$$

здесь кроме изменения внутренней энергии ΔU учтена кинетическая энергия течения $\mu v_{1,2}^2/2$.

Определим *молярную энтальпию* газа как $H = U + pV$. Тогда уравнение (1) можно переписать:

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

Это есть уравнение бернулли для течения газа, учитывающее его сжимаемость и внутреннюю энергию.

Внутри перегородки газ испытывает трение. Это приводит к необратимому переходу почти всей кинетической энергии газа в тепловую. Теплообмена с окружающей средой нет, поэтому вся энергия отдается обратно газу и уносится с потоком. Закон сохранения энергии (2) остается в силе, однако кинетическая энергия оказывается пренебрежимо малой. Приходим к выводу, что эффект Джоуля—Томсона — это процесс, в котором энтальпия сохраняется:

$$H_1 \approx H_2 \quad (3)$$

Энтальпия — функция состояния, зависящая от температуры и от давления. Коэффициентом Джоуля—Томсона называют отношение:

$$\mu_{J-T} = \frac{\Delta T}{\Delta p} \quad (4)$$

Эффект Джоуля—Томсона используется для получения низких температур, поэтому понижение температуры считается «положительным эффектом».

Газ Ван-Дер-Ваальса. В реальном газе внутренняя энергия зависит не только от температуры, но и от плотности газа: $U(T, V)$. Поэтому внешняя работа частично идет также на изменение внутренней энергии газа, что сопровождается изменением температуры. Рассмотрим модель реального газа: газ Ван-дер-Ваальса. Для него уравнения состояния:

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

$$U = C_V T - \frac{a}{V}.$$

Теплоемкость газа C_V будем для простоты считать неизменной. Константа a отвечает за притяжение молекул на дальних расстояниях, а константа b отвечает за отталкивание на малых расстояниях. Имеет смысл минимально возможного молярного объема газа. Энтальпия Ван-Дер-Ваальса:

$$H = U + pV = C_V T + RT \frac{V}{V - b} - \frac{2a}{V} \quad (5)$$

Формула не совсем удобна, поэтому для упрощения стоит воспользоваться тем, что газ в опыте достаточно разрежен. Давление не превышает 5 бар. Его поведение достаточно близко к идеальному, поэтому отличия от идеального стоит учитывать только в эффекте

Джоуля—Томсона. С учетом, что $C_V + R \approx C_p$ получится:

$$H \approx C_p T + p \left(b - \frac{2a}{RT} \right) \quad (6)$$

Также примем, что изменение температуры в опыте мало: $\Delta T/T \ll 1$. Тогда полагая $\Delta H = 0$ для предыдущего уравнения получим окончательное выражение для коэффициента Джоуля—Томсона:

$$\mu_{J-T} = -\frac{\Delta T}{\Delta p} \approx -\frac{b - 2a/RT}{C_p} \quad (7)$$

Температура инверсии. Из окончательного соотношения для коэффициента μ_{J-T} видно, что есть некоторая температура, при которой знак изменения температуры меняется:

$$T_{\text{inv}} = \frac{2a}{Rb}$$

При $T > T_{\text{inv}}$ газ нагревается, т.е. $\mu < 0$, а при $T < T_{\text{inv}}$ наоборот, охлаждается ($\mu > 0$). Для углекислого газа CO_2 температура инверсии $T_{\text{inv}} \sim 1500$ К при давлении $p \sim 1$ бар, то есть при комнатной температуре газ будет охлаждаться, $\mu > 0$.

2 Экспериментальная установка.

Схема установки представлена на Рис. 1. Основным элементом является трубка 1 с пористой перегородкой 2, через которую пропускается газ. Трубка имеет длину 80 мм и сделана из нержавеющей стали, поэтому имеет малую теплопроводность. Диаметр трубки $d = 3$ мм, толщина стенок 0.2 мм. Пористая перегородка расположена в конце трубки и представляет собой стеклянную пористую пробку. Пористость и толщина перегородки подобрана так, чтобы обеспечить оптимальный поток газа при разнице давлений $\Delta p \leq 4$ бар.

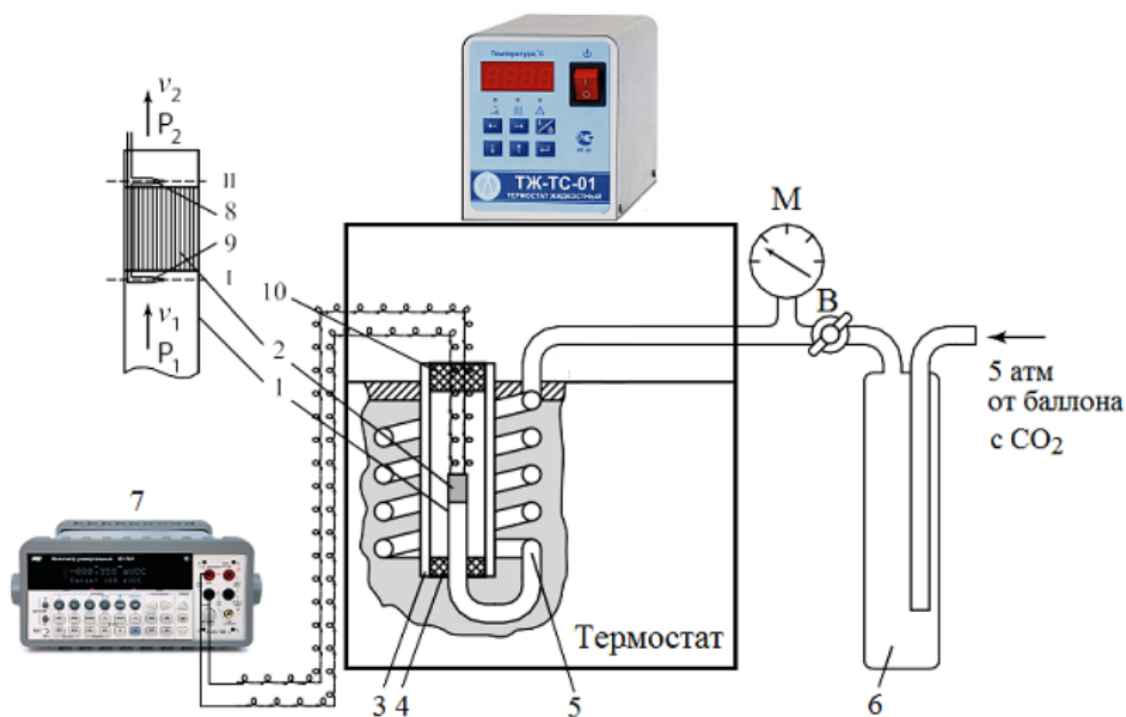


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Углекислый газ подается под давлением через змеевик 5 из баллона 6. Бедный змеевик омывается водой и нагревает газ до температуры воды в термостате.

Давление газа измеряется манометром М и регулируется вентилем В. Манометр показывает разницу между давлением внутри трубки и атмосферой. Поэтому нормальное показание манометра равно нулю.

Разность температур газа до и после перегородки измеряется дифференциальной термопарой медь—константан. С помощью вольтметра 7 измеряется разность потенциалов V , которая возникает из-за разницы температур. Зависимость $V(t)$ не является линейной, однако в этой работе измеряются малые перепады температур, поэтому этим можно пренебречь. Чувствительность термопары также зависит от температуры, поэтому нам была предоставлена таблица коэффициентов dV/dt для разных температур.

3 Обработка результатов измерений

В результате измерений были получены данные для 4-х различных температур. Для каждой температуры были измерены разницы потенциалов V (которые впоследствии будут переведены в разность температур ΔT) при различных перепадах давления в промежутке от $p = 1.5$ bar до $p = 4$ bar. Таблицы с полученными данными приведены в приложении.

Величина показания вольтметра в отсутствие потока газа (постоянные паразитические эффекты) была пренебрежимо мала, поэтому не учитывалась.

Отложив полученные значения по наклону прямой $\Delta T(\Delta p)$ можно определить значения коэффициента μ_{J-T} .

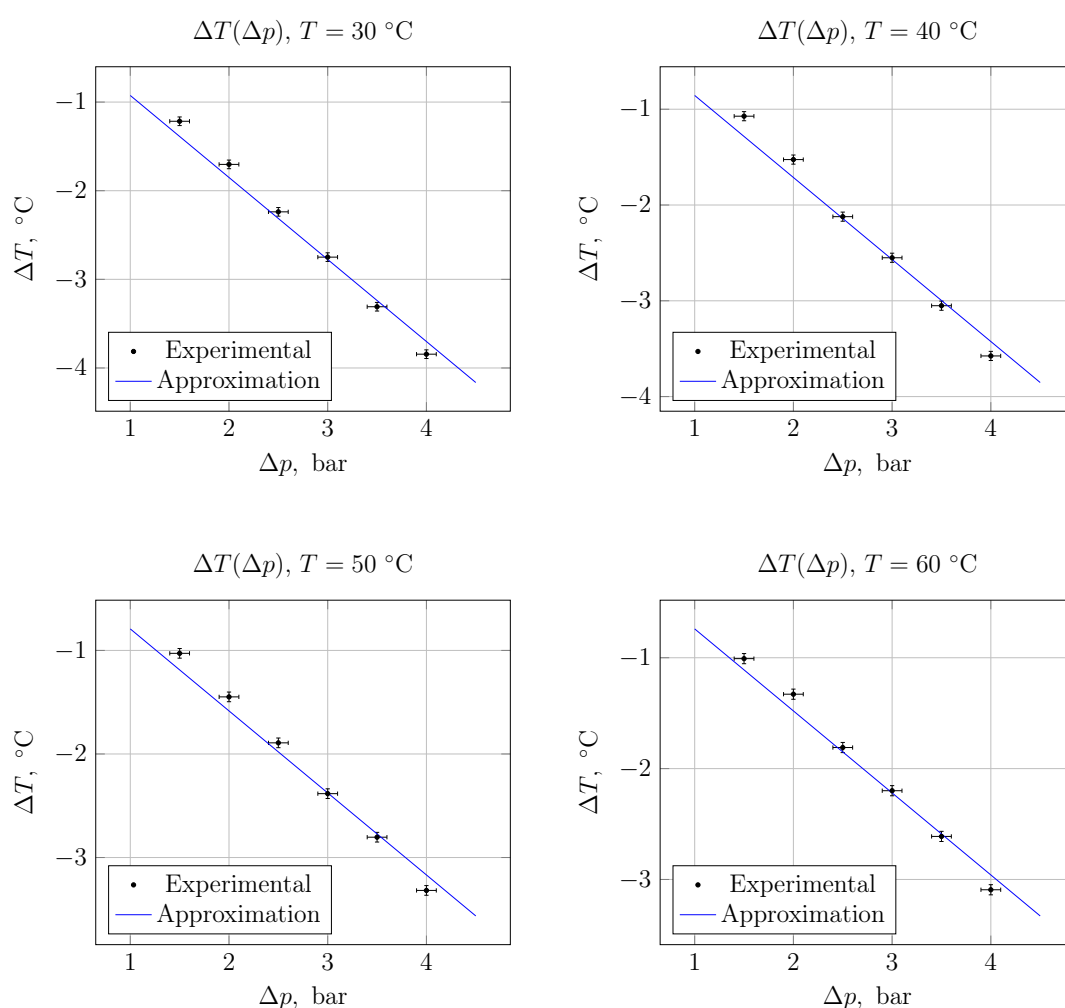


Рис. 2: Полученные точки и аппроксимация зависимости методом МНК.

Как видно, точки хорошо ложатся на прямую во всех четырех случаях. По методу МНК проведем прямые и возьмем коэффициенты наклона $k = \mu_{J-T}$ для каждой температуры. Изменение температуры в данном случае отрицательное, это зависит от полярности термопары, которая в данном случае подключена таким образом, что $\Delta T = T_{\text{out}} - T_{\text{in}}$, то есть показывает «положительный» эффект Джоуля—Томсона.

Методом МНК получены коэффициенты наклона k для каждой температуры:

$$k_1 = (-0.925 \pm 0.018) \text{ K/bar}$$

$$k_2 = (-0.856 \pm 0.021) \text{ K/bar}$$

$$k_3 = (-0.792 \pm 0.017) \text{ K/bar}$$

$$k_4 = (-0.740 \pm 0.015) \text{ K/bar}$$

Полученные значения близки к табличным (порядка 0.7–0.8 при 40–60 °С при 1 bar).

Важно заметить, что аппроксимация не совсем ложится на прямую, так как при отсутствующей разнице давлений наблюдалось отсутствие разницы температур, поэтому аппроксимация осуществлялась прямой $y = kx$.

Теперь построим зависимость $\mu_{J-T}(1/T)$. Она должна быть линейной. Из этой зависимости мы можем определить постоянные a и b в модели газа Ван-Дер-Ваальса.

Точки хорошо ложатся на прямую. Будем аппроксимировать по МНК прямой $y = Kx + B$.

Коэффициент наклона, согласно теории, равен:

$$K = \frac{1}{C_p} \cdot \frac{2a}{R}$$

Координата по y точки пересечения с осью ординат B равна:

$$B = -\frac{b}{C_p}$$

Получили $K = 627.05$, $B = -1.14$. В нашем диапазоне температур C_p углекислого газа ≈ 860 Дж/кг °С. Полученные значения соответствуют следующим значениям постоянных модели Ван-Дер-Ваальса:

$$b \approx 431.38 \frac{\text{см}^3}{\text{моль}}$$

$$a \approx 0.99 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{моль}^2}$$

Пересечение графика с осью абсцисс наблюдается при $1/T = 0.0183$, что дает температуру порядка 550 К. Это намного ниже теоретической оценки более тысячи К.

Полученные значения значительно отличаются от табличных.

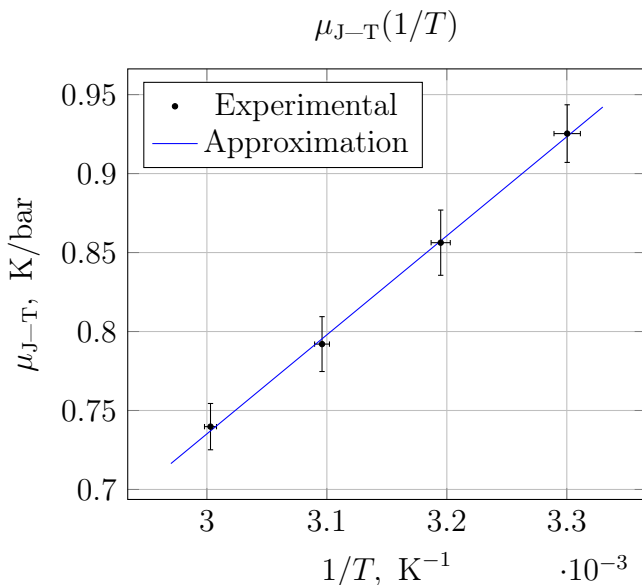


Рис. 3: Зависимость коэффициента Джоуля–Томсона от температуры.

4 Обсуждение результатов и выводы.

В результате работы получены зависимости изменения температуры вследствие эффекта Джоуля–Томсона от разницы давления при

различных температурах. Полученные зависимости оказались линейными, коэффициент их наклона есть искомый коэффициент Джоуля–

Томсона. Полученные значения хорошо соотносятся с табличными.

При экстраполяции полученных коэффициентов Джоуля—Томсона от температуры полу-

чены постоянные a , b модели газа Ван-Дер-Ваальса, а также получена оценка температуры инверсии T_{inv} . Полученные значения достаточно сильно отличаются от табличных, что говорит о несовершенстве модели.

5 Приложение

Δp , bar	4	3.5	3	2.5	2	1.5
ΔV , μV	−150	−128	−107	−89	−64	−45
$\Delta V/\Delta T$, $\mu\text{V/K}$	41.95	41.95	41.95	41.95	41.95	41.95
ΔT , K	−3.58	−3.05	−2.55	−2.12	−1.53	−1.07

Рис. 4: Результаты измерений при $T = 30\text{ }^\circ\text{C}$

Δp , bar	4	3.5	3	2.5	2	1.5
ΔV , μV	−142	−120	−102	−81	−62	−44
$\Delta V/\Delta T$, $\mu\text{V/K}$	42.8	42.8	42.8	42.8	42.8	42.8
ΔT , K	−3.32	−2.80	−2.38	−1.89	−1.45	−1.03

Рис. 5: Результаты измерений при $T = 40\text{ }^\circ\text{C}$

Δp , bar	4	3.5	3	2.5	2	1.5
ΔV , μV	−135	−114	−96	−79	−58	−44
$\Delta V/\Delta T$, $\mu\text{V/K}$	43.65	43.65	43.65	43.65	43.65	43.65
ΔT , K	−3.09	−2.61	−2.20	−1.81	−1.33	−1.01

Рис. 6: Результаты измерений при $T = 50\text{ }^\circ\text{C}$

Δp , bar	4	3.5	3	2.5	2	1.5
ΔV , μV	−158	−136	−113	−92	−70	−50
$\Delta V/\Delta T$, $\mu\text{V/K}$	41.1	41.1	41.1	41.1	41.1	41.1
ΔT , K	−3.84	−3.31	−2.75	−2.24	−1.70	−1.22

Рис. 7: Результаты измерений при $T = 60\text{ }^\circ\text{C}$