

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 термопара; 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 $\Delta \nu = 1$ mol. 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.

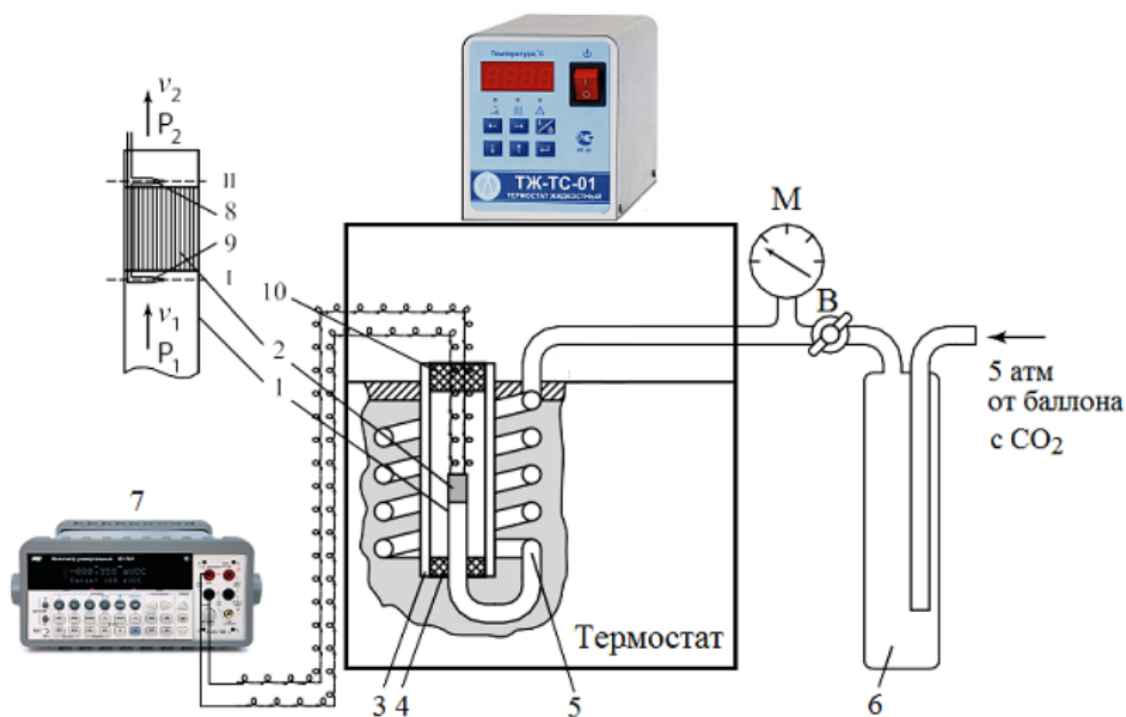


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

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 получен-

ными 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} .

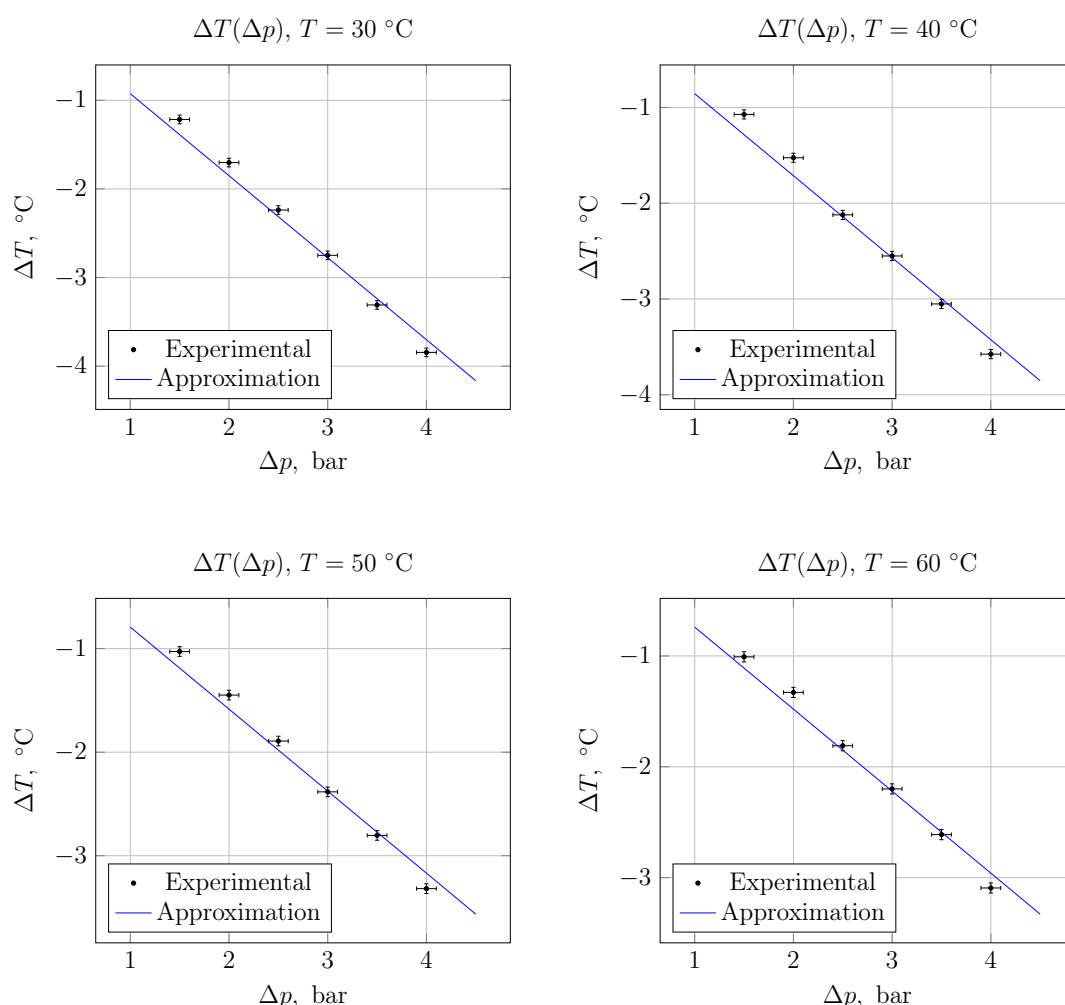


Рис. 2: Полученные точки и аппроксимация зависимости методом МНК.

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 °C 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.

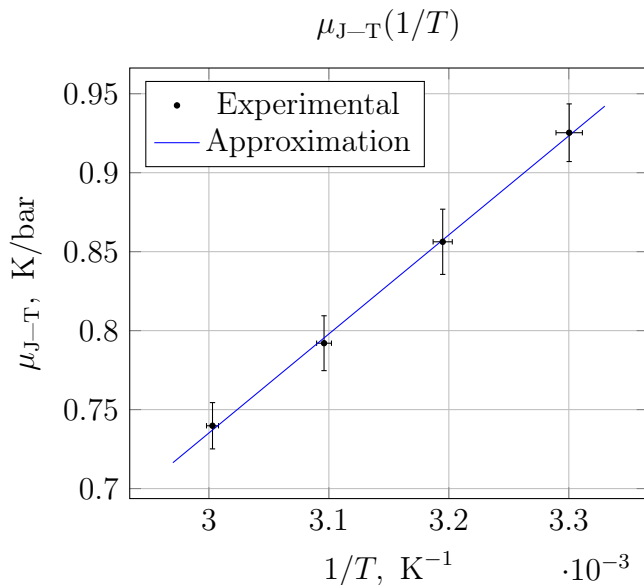


Рис. 3: Зависимость коэффициента Джоуля—Томсона от температуры.

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 $\approx 860 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$. Полученные значения соответствуют следующим значениям постоянных модели Ван-Дер-Ваальса:

$$b \approx 431.38 \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}$$

$$a \approx 0.99 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^4}{\text{mol}^2}$$

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.

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 получены 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 эксперимента.