

Отчет о выполнении работы №2.1.6
Эффект Джоуля-Томпсона

Воейко Андрей Александрович, Б01-109

Долгопрудный, 2022

1 Аннотация.

В работе определяется изменение температуры углекислого газа при протекании через малопроницаемую перегородку при разных начальных значениях давления и температуры. Также вычисляются коэффициенты a и b уравнения Ван-Дер-Ваальса.

2 Теоретические сведения.

Эффект Джоуля-Томпсона – это изменение температуры газа, медленно перетекающего из области высокого давления в область низкого давления в условиях хорошей тепловой изоляции. Возникает он из-за того, что сближаясь, молекулы (или атомы) газа начинают взаимодействовать друг с другом, а именно отталкиваться, что приводит к увеличению потенциальной энергии их взаимодействия, и, как следствие, уменьшению их кинетической энергии, то есть температуры. В разреженных газах, по своим свойствам приближающимся к идеальным, такой эффект не наблюдается. Таким образом, эффект Джоуля-Томпсона демонстрирует отличие газа от идеального.

В работе исследуется изменение температуры газа при медленном течении по трубке с пористой перегородкой. Трубка 1 хорошо изолирована. Газ из области повышенного давления P_1 проходит в область с атмосферным давлением P_2 . Перепад давления $\Delta P = P_1 - P_2$ заметно даже при небольшой скорости течения газа в трубке ввиду большого сопротивления каналов. Величина эффекта Джоуля-Томпсона может быть определена по разности температуры до и после перегородки.

Рассмотрим стационарный поток газа между двумя сечениями I и II , до и после перегородки соответственно. Для определенности рассмотрим прошедший через трубку 1 моль углекислого газа, молярная масса которого составляет μ моль. Молярные объемы газа, его давления и отнесенные к молю внутренние энергии в сечениях I и II обозначим соответственно V_1, P_1, U_1 и V_2, P_2, U_2 . Для того, чтобы ввести газ объемом V_1 в трубку, нужно совершить работу $A_1 = P_1 V_1$. При прохождении через сечение 2, газ совершает работу. Поскольку через боковые стенки не происходит обмена теплом, справедлива формула:

$$A_1 - A_2 = \left(U_2 + \frac{\mu v_2^2}{2} \right) - \left(U_1 + \frac{\mu v_1^2}{2} \right). \quad (1)$$

Теперь найдем изменение энтальпии. Подставляя вместо PV соответствующую работу A , получаем:

$$H_1 - H_2 = (U_1 + P_1 V_1) - (U_2 + P_2 V_2) = \frac{1}{2} \mu (v_2^2 - v_1^2). \quad (2)$$

Процесс Джоуля-Томпсона в чистом виде осуществляется только в том случае, если правой частью можно пренебречь. У нас пока нет критериев, позволяющих точно это установить, но тем не менее предположим, что это так. Тогда коэффициент Джоуля-Томпсона равен:

$$\mu_{\text{д-т}} = \frac{\Delta T}{\Delta P} \approx \frac{(2a/RT) - b}{C_p}. \quad (3)$$

3 Экспериментальная установка.

3.1 Используемые приборы.

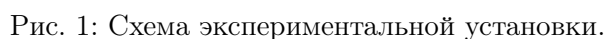
В работе используются:

- Трубка с пористой перегородкой.
- Труба Дьюара.
- Термометры.
- Дифференциальная термopара.
- Микровольтметр.
- Балластный баллон.
- Манометр.

3.2 Описание установки.

Схема установки изображена на рисунке 1. Основным элементом установки является трубка 1 с пористой перегородкой 2, через которую пропускается исследуемый газ. Трубка имеет длину 80 мм и сделана из нержавеющей стали, обладающей, как известно, малой теплопроводностью. Диаметр трубки $d = 33$ мм, толщина стенок 0,2 мм. Пористая перегородка расположена в конце трубки и представляет собой стеклянную пористую пробку со множеством узких и длинных каналов. Пористость и толщина пробки ($l = 5$ мм) подобраны так, чтобы обеспечить оптимальный поток газа при перепаде давлений $\Delta P \leq 4$ атм (расход газа составляет примерно $10 \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$); при этом в результате эффекта Джоуля-Томпсона создается достаточная разность температур.

Углекислый газ поступает под повышенным давлением в трубку через змеевик 5 из балластного баллона 6. Медный змеевик омывается водой и нагревает медленно протекающий через него газ до температуры воды в термостате. Температура воды измеряется термометром $T_{\text{в}}$ помещенном в термостате. Требуемая температура воды устанавливается и поддерживается во время эксперимента при помощи контактного термометра



Давление газа в трубке измеряется манометром М и регулируется вентилем В (при открытии вентиля В, т. е. при повороте ручки против часовой стрелки, давление P_1 повышается). Манометр М измеряет разность между давлением внутри трубки и наружным (атмосферным) давлением. Так как углекислый газ после пористой перегородки выходит в область с атмосферным давлением P_2 , то этот манометр непосредственно измеряет перепад давления на входе и на выходе трубки $\Delta P = P_1 - P_2$.

4

4 Результаты измерений и обработка данных.

4.1 Измерения разности в зависимости от температуры.

Проведем четыре серии измерений зависимости изменения температуры от подаваемого давления при четырех разных температурах. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Серия измерений				1
№	ΔP , атм	$U_{\text{тп}}$, мкВ	ΔT , °C	T , °C
1	4,0	-150 ± 1	$3,69 \pm 0,02$	$20,20 \pm 0,01$
2	3,5	-128 ± 1	$3,14 \pm 0,02$	$20,23 \pm 0,01$
3	3,0	-107 ± 1	$2,64 \pm 0,02$	$20,24 \pm 0,01$
4	2,5	-87 ± 1	$2,14 \pm 0,02$	$20,26 \pm 0,01$
5	2,0	-60 ± 1	$1,47 \pm 0,02$	$20,33 \pm 0,01$
Серия измерений				2
№	ΔP , атм	$U_{\text{тп}}$, мкВ	ΔT , °C	T , °C
1	4,0	-147 ± 1	$3,53 \pm 0,02$	$30,06 \pm 0,01$
2	3,5	-121 ± 1	$2,91 \pm 0,02$	$30,09 \pm 0,01$
3	3,0	-99 ± 1	$2,38 \pm 0,02$	$30,08 \pm 0,01$
4	2,5	-79 ± 1	$1,90 \pm 0,02$	$30,08 \pm 0,01$
5	2,0	-56 ± 1	$1,35 \pm 0,02$	$30,06 \pm 0,01$
Серия измерений				3
№	ΔP , атм	$U_{\text{тп}}$, мкВ	ΔT , °C	T , °C
1	4,0	-141 ± 1	$3,32 \pm 0,02$	$40,07 \pm 0,01$
2	3,5	-122 ± 1	$2,87 \pm 0,02$	$40,07 \pm 0,01$
3	3,0	-99 ± 1	$2,33 \pm 0,02$	$40,08 \pm 0,01$
4	2,5	-79 ± 1	$1,86 \pm 0,02$	$40,07 \pm 0,01$
5	2,0	-60 ± 1	$1,41 \pm 0,02$	$40,00 \pm 0,01$
Серия измерений				4
№	ΔP , атм	$U_{\text{тп}}$, мкВ	ΔT , °C	T , °C
1	4,0	-131 ± 1	$3,03 \pm 0,02$	$50,10 \pm 0,01$
2	3,5	-109 ± 1	$2,51 \pm 0,02$	$50,06 \pm 0,01$
3	3,0	-90 ± 1	$2,08 \pm 0,02$	$50,05 \pm 0,01$
4	2,5	-72 ± 1	$1,66 \pm 0,02$	$50,05 \pm 0,01$
5	2,0	-51 ± 1	$1,18 \pm 0,02$	$50,05 \pm 0,01$

Таблица 1: Зависимость изменения температуры от подаваемого давления в первой серии экспериментов.

Во всех случаях разброс температур менее одного процента, что позволяет считать её постоянной для каждой серии измерений.

4.2 Графики зависимости ΔT от ΔP .

Построим график зависимости изменения температуры от разности давлений для всех четырех серий измерений. Проведем прямые через все четыре графика.

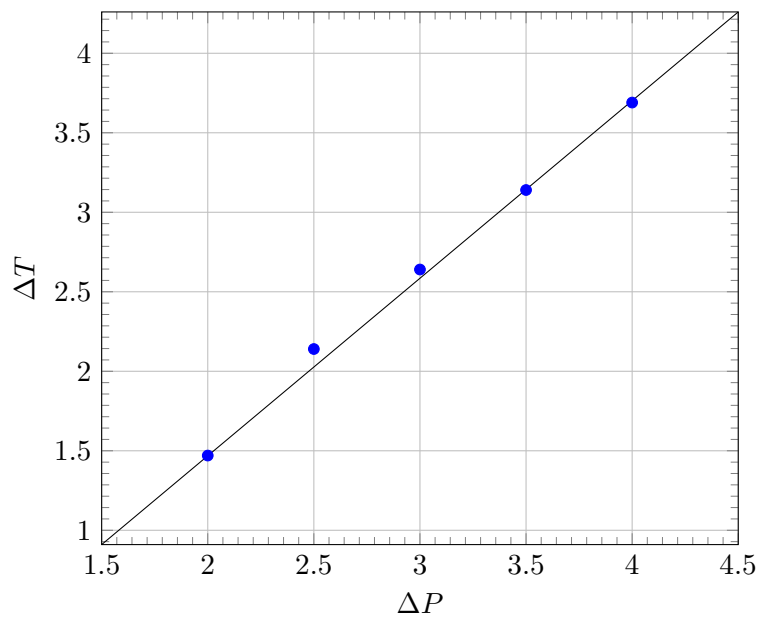


Рисунок 2: Зависимость изменения температур от разницы давлений в первой серии измерений.

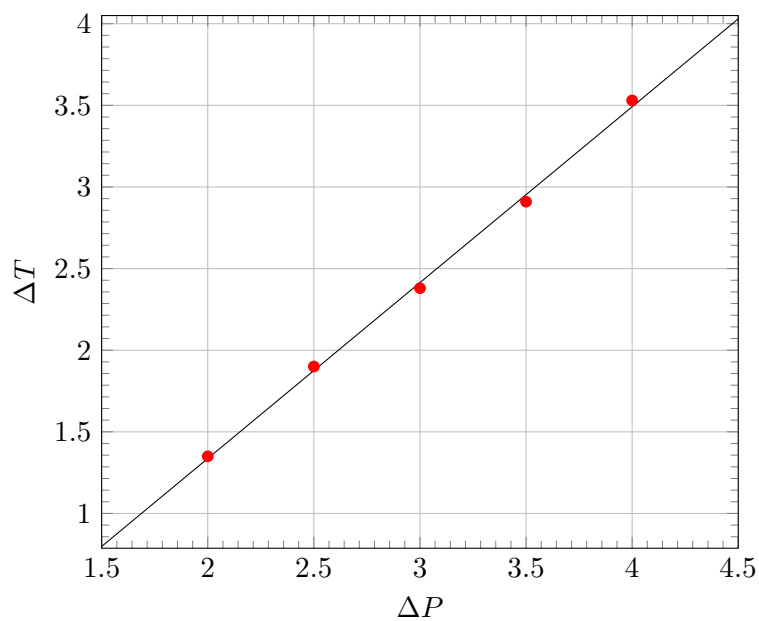


Рисунок 3: Зависимость изменения температур от разницы давлений во второй серии измерений.

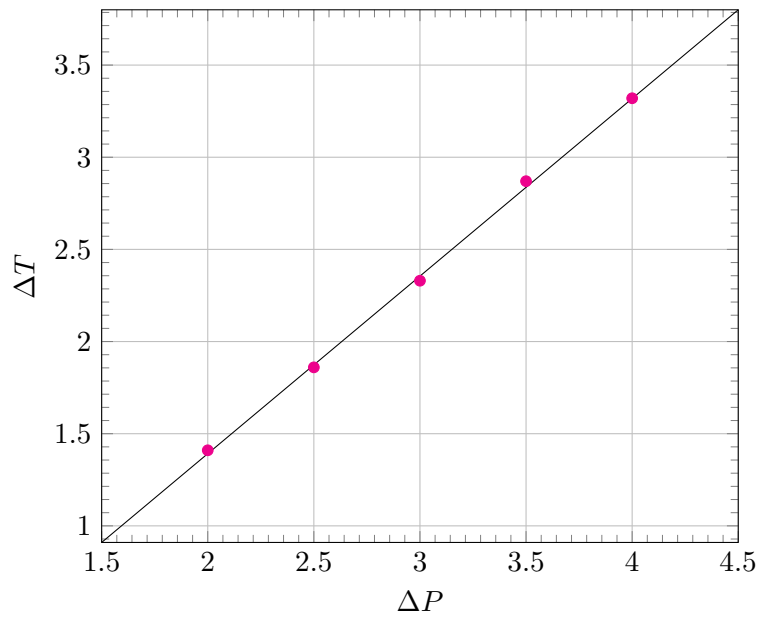


Рисунок 4: Зависимость изменения температур от разницы давлений в третьей серии измерений.

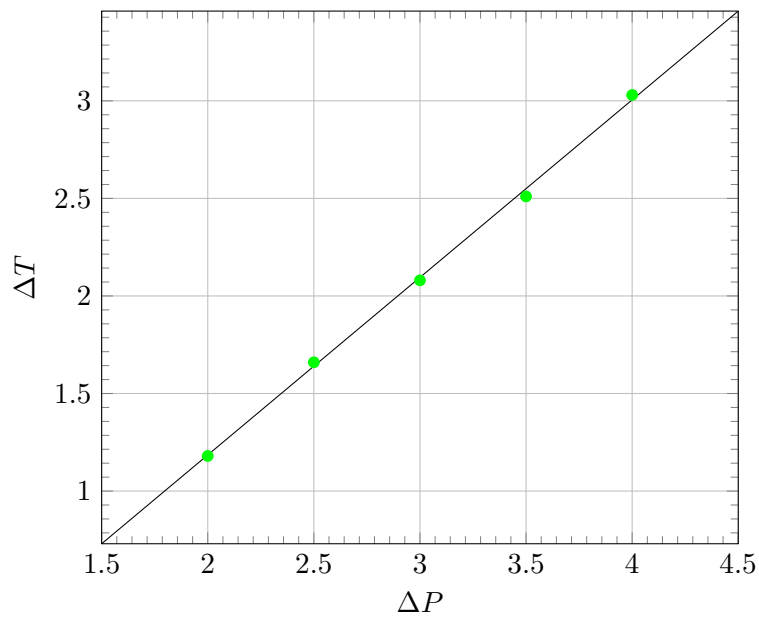


Рисунок 5: Зависимость изменения температур от разницы давлений в четвертой серии измерений.

Вычислим коэффициент угла наклона графиков для каждой серии измерений методом наименьших квадратов.

$$k_1 = 1,12 \pm 0,02 \frac{\text{K}}{\text{атм}}.$$

$$k_2 = 1,07 \pm 0,02 \frac{\text{К}}{\text{атм}}.$$

$$k_3 = 0,96 \pm 0,01 \frac{\text{К}}{\text{атм}}.$$

$$k_4 = 0,91 \pm 0,01 \frac{\text{К}}{\text{атм}}.$$

Таким образом,

$$\mu_1 = 1,12 \pm 0,02 \frac{\text{К}}{\text{атм}} = 1,10 \cdot 10^{-5} \pm 0,02 \cdot 10^{-5} \frac{^\circ\text{С}}{\text{Па}},$$

$$\mu_2 = 1,07 \pm 0,02 \frac{\text{К}}{\text{атм}} = 1,06 \cdot 10^{-5} \pm 0,02 \cdot 10^{-5} \frac{^\circ\text{С}}{\text{Па}},$$

$$\mu_3 = 0,96 \pm 0,01 \frac{\text{К}}{\text{атм}} = 0,95 \cdot 10^{-5} \pm 0,01 \cdot 10^{-5} \frac{^\circ\text{С}}{\text{Па}},$$

$$\mu_4 = 0,91 \pm 0,01 \frac{\text{К}}{\text{атм}} = 0,90 \cdot 10^{-5} \pm 0,01 \cdot 10^{-5} \frac{^\circ\text{С}}{\text{Па}}.$$

4.3 Поиск коэффициентов a и b Ван-дер-Ваальса.

Согласно формуле 3,

$$\mu_{\text{д-т}} \approx \frac{\frac{2a}{RT} - b}{C_p} = \frac{2a}{RC_p} \frac{1}{T} - \frac{b}{C_p}.$$

Таким образом, построив график $\mu_{\text{д-т}} \left(\frac{1}{T} \right)$ и аппроксимировав его к прямой $\mu_{\text{д-т}} = \alpha + \beta \frac{1}{T}$, мы по этим коэффициентам α и β сможем найти коэффициенты b и a , соответственно.

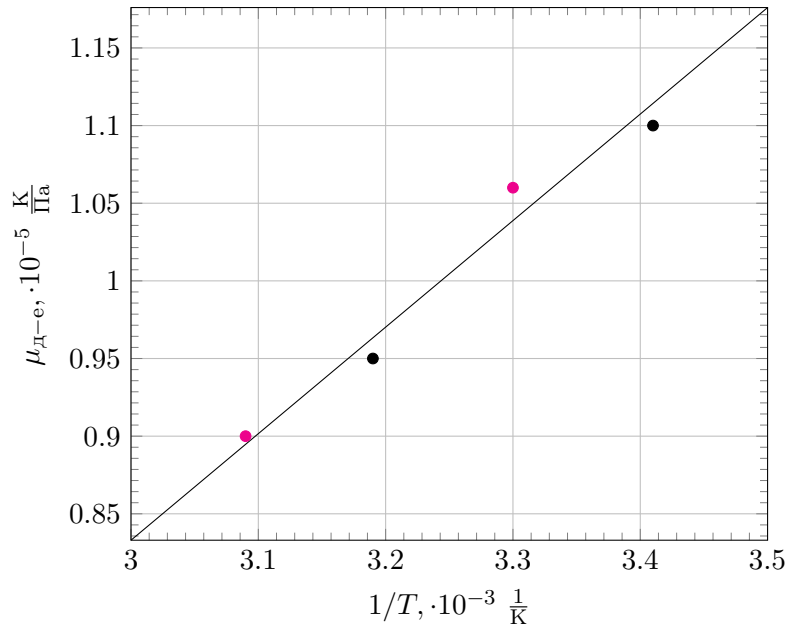


Рисунок 5: Зависимость изменения температур от разницы давлений в четвертой серии измерений.

После аппроксимации получаем:

$$\alpha = -\frac{b}{C_p} = -1,2 \cdot 10^{-5} \pm 0,2 \cdot 10^{-5} \Rightarrow b = 36 \pm 6 \frac{\text{см}^3}{\text{моль}}.$$

$$\beta = \frac{2a}{RC_p} = 0,0069 \pm 0,0006 \Rightarrow a = 0,41 \pm 0,04 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{моль}^2}.$$

5 Выводы.

В ходе работы были найдены коэффициенты Джоуля-Томпсона для четырех различных температур.

$$\mu_1 = 1,12 \pm 0,02 \frac{\text{К}}{\text{атм}} = 1,10 \cdot 10^{-5} \pm 0,02 \cdot 10^{-5} \frac{^\circ\text{С}}{\text{Па}},$$

$$\mu_2 = 1,07 \pm 0,02 \frac{\text{К}}{\text{атм}} = 1,06 \cdot 10^{-5} \pm 0,02 \cdot 10^{-5} \frac{^\circ\text{С}}{\text{Па}},$$

$$\mu_3 = 0,96 \pm 0,01 \frac{\text{К}}{\text{атм}} = 0,95 \cdot 10^{-5} \pm 0,01 \cdot 10^{-5} \frac{^\circ\text{С}}{\text{Па}},$$

$$\mu_4 = 0,91 \pm 0,01 \frac{\text{К}}{\text{атм}} = 0,90 \cdot 10^{-5} \pm 0,01 \cdot 10^{-5} \frac{^\circ\text{С}}{\text{Па}}.$$

Для первой и третьей серий измерений есть табличные значения, составляющие соответственно $\mu_1^{(\text{табл})} = 1,105$ и $\mu_3^{(\text{табл})} = 0,958$ для давления порядка ≈ 1 атм, что позволяет считать наши измерения вполне точными, так как оба значения лежат в пределах погрешности.

А вот построение графика выявило, что оставшиеся два измерения (первое и третье слева на графике, выделены светлым цветом) проведены с ошибкой, в результате чего поиск коэффициентов a и b уравнения Ван-дер-Ваальса был произведен с большой погрешностью в 25% для a и 17% для b .

Сами значения составили:

$$a = 0,41 \pm 0,04 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{моль}^2},$$

$$b = 36 \pm 6 \frac{\text{см}^3}{\text{моль}}.$$

Табличные же значения этих величин составляют соответственно $a^{(\text{табл})} = 0,37 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{моль}^2}$ и $b^{(\text{табл})} = 43 \frac{\text{см}^3}{\text{моль}}$, что укладывается в погрешность, но это можно скорее считать счастливым стечением обстоятельств, чем подтверждением результатов вычисления.