

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
Физтех-школа физики и исследований им.Ландау

Лабораторная работа №2.1.6
(Лабораторный практикум по общей физике)

Эффект Джоуля-Томсона

Работу выполнил:
Климанов Даниил, группа Б02-115

г. Долгопрудный, 2022

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 .

Оборудование: трубка с пористой перегородкой; труба Дьюара; термостат; термометры; дифференциальная термopара; микровольтметр; балластный баллон; манометр.

1 Теоретическое введение:

Эффектом Джоуля-Томсона называется изменение температуры газа, медленно протекающего из области высокого в область низкого давления в условиях хорошей тепловой изолированности. Сильно разреженные газы, которые по своим свойствам близки к идеальным, при протекании не меняют своей температуры. Таким образом, эффект Джоуля-Томсона демонстрирует отличие исследуемого газа от идеального.

Рассмотрим стационарный поток газа между произвольными сечениями 1 и 2 трубки (до перегородки и после неё). Пусть через трубку прошёл 1 моль углекислого газа; μ - его молярная масса. Молярные объёмы газа, его давления и молярные внутренние энергии обозначим через V_1, P_1, U_1 и V_2, P_2, U_2 соответственно. Чтобы провести газ через первое сечение, необходимо совершить работу $A_1 = P_1 V_1$; при прохождении второго сечения газ совершает работу $A_2 = P_2 V_2$. Так как система энергетически изолирована, то из ЗСЭ:

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

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

Для вывода соотношения мы пренебрегли потерями энергии на нагрев перегородки, который тем не менее может быть очень существенным. Если температура трубки установилась, то равенство становится точным (при условии малости потерь энергии через изоляцию). Процесс Джоуля-Томсона реализуется лишь в том случае, когда правой частью в уравнении (2) можно пренебречь, т.е. если скорости газов по обе стороны перегородки малы. В этом случае уравнение (2) можно интерпретировать, как постоянство энтальпии газа. Тогда коэффициент Джоуля-Томсона после разложения в ряд и пренебрежения членами выше первого порядка примет вид:

$$\mu_{D-T} = \frac{\Delta T}{\Delta P} \approx \frac{\frac{2a}{RT} - b}{C_p} \quad (3)$$

$$T_i = \frac{2a}{Rb} \quad (4)$$

, где T_i - температура инверсии при которой изменение температуры в дифференциальном эффекте Джоуля-Томсона отсутствует; При $T = T_i$ выполнено: $\mu_{D-T} \approx 0$. Используя

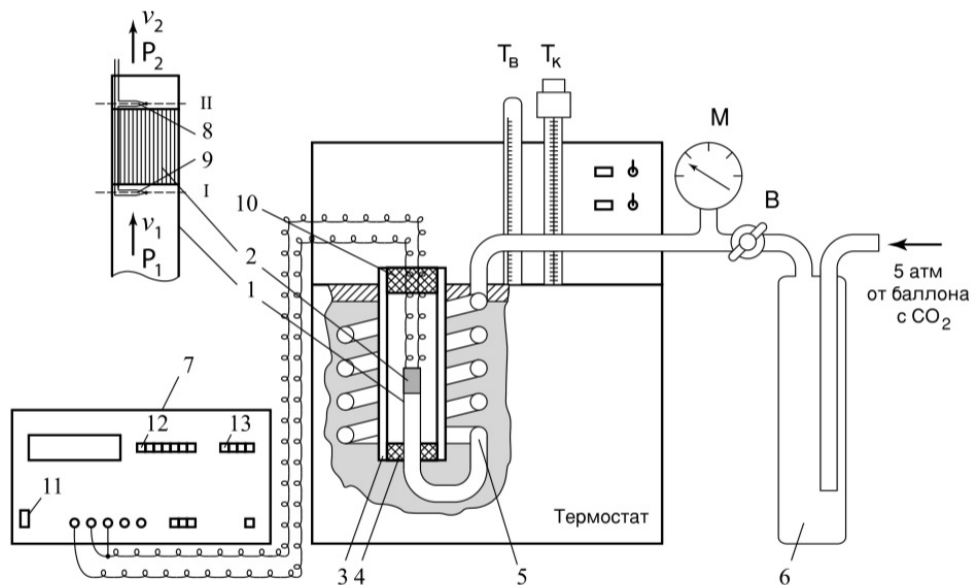


Рис. 1. Схема установки для изучения эффекта Джоуля–Томсона

связь коэффициентов a, b с критической температурой, по соотношению $T_{cr} = \frac{8a}{27Rb}$ выразим T_{inv} :

$$T_{inv} = \frac{27}{4} \cdot T_{cr} \quad (5)$$

Как можно видеть, $T < T_{inv}$ влечёт $\mu_{D-T} > 0$, газ охлаждается; из $T > T_{inv}$ следует $\mu_{D-T} < 0$, газ нагревается (Поскольку $\Delta P > 0$).

В данной лабораторной работе исследуется коэффициент дифференциального эффекта Джоуля-Томсона для углекислого газа. По экспериментальным результатам оценивается коэффициент теплового расширения, постоянные a и b в уравнении Вандер-Ваальса и температура инверсии углекислого газа. Начальная температура газа T_1 задаётся термостатом. Измерения проводятся при трёх температурах: $20^\circ C$, $30^\circ C$, $40^\circ C$.

2 Экспериментальная установка:

Схема установки приведена на рисунке 1. Ниже представлена зависимость чувствительности термопары от температуры из [1]:

Температура, $^{\circ}C$	0-10	11-20	21-30	31-40	41-50
мкВ/ $^{\circ}C$	38,9	39,8	40,7	41,6	42,5
Температура, $^{\circ}C$	51-60	61-70	71-80	81-90	91-100
мкВ/ $^{\circ}C$	43,3	44,1	44,9	45,6	46,4

Таблица подкорректирована в соответствии с тем, что для температур 10, 20, 30 и т.д. при расчётах были использованы меньшие значения чувствительности термомпары. В качестве атмосферного давления будет использовано значений 98000 Па.

3 Выполнение измерений:

Измерения были выполнены для трёх значений температур: 20, 30, 40 $^{\circ}C$:

T, $^{\circ}C$	ΔP_1 , атм	$U(P_1)$, mV	ΔP_2 , атм	$U(P_2)$, mV	ΔP_3 , атм	$U(P_3)$, mV	ΔP_4 , атм	$U(P_4)$, mV	ΔP_5 , атм	$U(P_5)$, mV
20	4	-0,151	3,6	-0,135	3,24	-0,1175	2,82	-0,098	2,4	-0,0795
30	4	-0,146	3,6	-0,126	3,24	-0,1095	2,82	-0,0915	2,4	-0,075
40	4	-0,137	3,6	-0,118	3,24	-0,102	2,82	-0,0835	2,4	-0,068

Table 1: Зависимость перепада напряжения от перепада давления при фиксированной начальной температуре

Температура, $^{\circ}C$	20	30	40
Напряжении, mV	-0,013	-0,03	-0,001

Table 2: Напряжение при отсутствие перепада давлений

4 Обработка измерений:

4.1 Оценка коэффициентов Джоуля-Томсона:

Обработав таблицы из предыдущего раздела, получаем следующие графики(треугольниками отмечены измеренные точки, а линиями - прямые МНК): Коэффициенты наклона графиков (коэффициенты Джоуля-Томсона для соответствующих температур) имеют

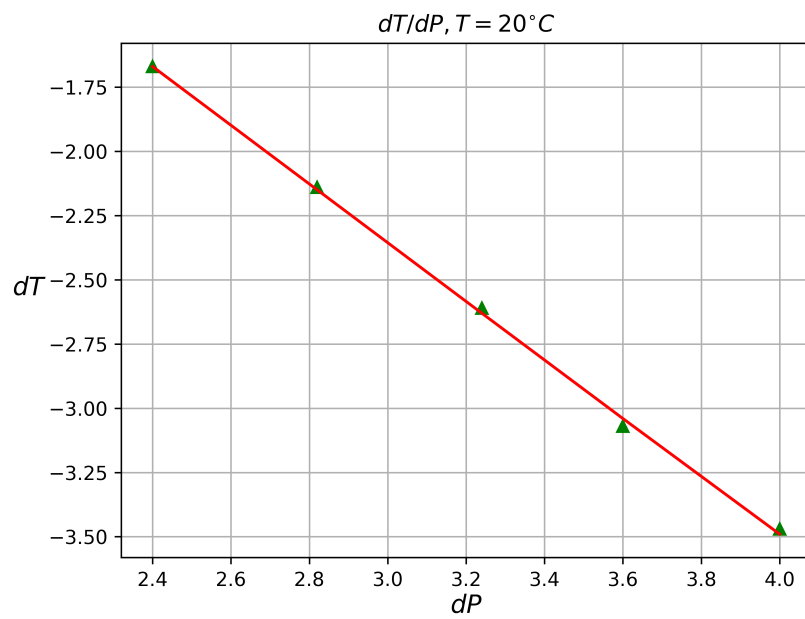


Figure 1: $\Delta T(\Delta P)$ при $T = 20^\circ C$

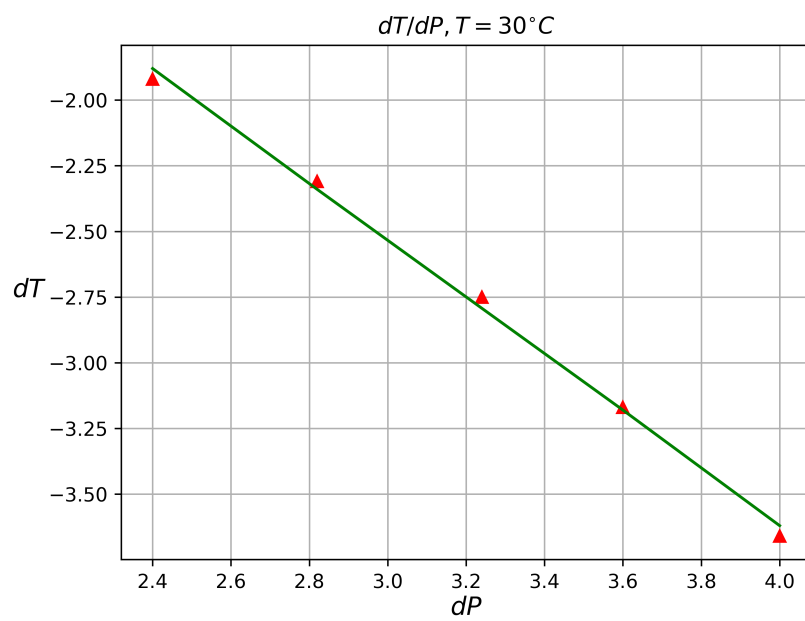


Figure 2: $\Delta T(\Delta P)$ при $T = 30^\circ C$

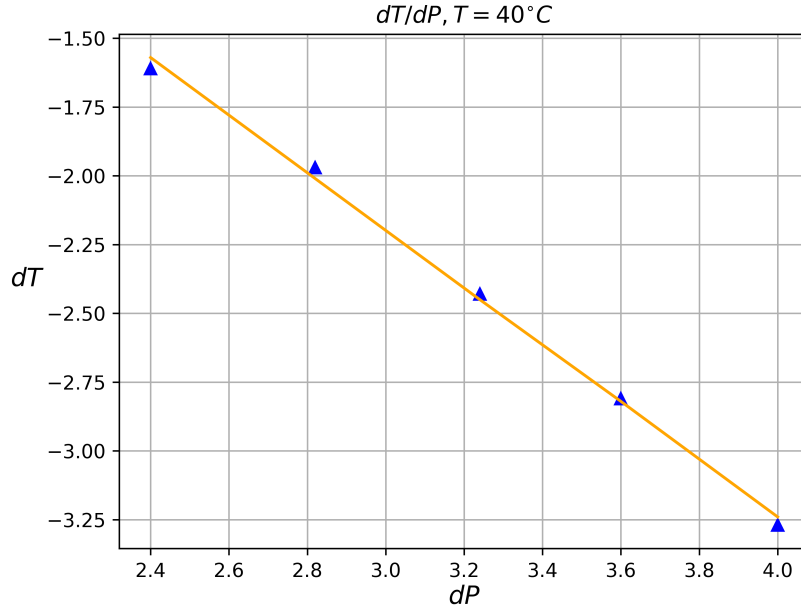


Figure 3: $\Delta T(\Delta P)$ при $T = 40^\circ C$

следующие значения:

$$T = 20^\circ C \Rightarrow \mu_1 = -(1,14 \pm 0,02) \quad (6)$$

$$T = 30^\circ C \Rightarrow \mu_2 = -(1,09 \pm 0,03) \quad (7)$$

$$T = 40^\circ C \Rightarrow \mu_3 = -(1,045 \pm 0,02) \quad (8)$$

4.2 Оценка коэффициентов Вандер-Ваальса для углекислого газа:

Оценим коэффициенты a и b по двум парам температур (20 и 30 °C; 30 и 40 °C) с помощью уравнения (3). Примем C_p для углекислого газа равным 40 Дж/моль К

4.2.1 Первая пара температур:

$$\begin{cases} \mu_1 \approx \frac{\frac{2a}{RT_1} - b}{C_p} \\ \mu_2 \approx \frac{\frac{2a}{RT_2} - b}{C_p} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_1 = \frac{R(\mu_2 - \mu_1)C_p T_2 T_1}{2 \cdot (T_1 - T_2)} \approx -0,75 \\ \sigma a_1 \sim a_1 \\ b_1 = \frac{C_p}{T_1 - T_2} \cdot (\mu_2 T_2 - \mu_1 T_1) \approx 15 \cdot 10^{-5} \\ \sigma b_1 \sim b_1 \end{cases} \quad (9)$$

4.2.2 Вторая пара температур:

$$\begin{cases} \mu_2 \approx \frac{\frac{2a}{RT_2} - b}{C_p} \\ \mu_3 \approx \frac{\frac{2a}{RT_3} - b}{C_p} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_2 = \frac{R(\mu_3 - \mu_2)C_p T_3 T_2}{2 \cdot (T_2 - T_3)} \approx -0,74 \\ \sigma a_2 \sim a_2 \\ b_2 = \frac{C_p}{T_2 - T_3} \cdot (\mu_3 T_3 - \mu_2 T_2) \approx 14 \cdot 10^{-5} \\ \sigma b_2 \sim b_2 \end{cases} \quad (10)$$

4.3 Температура инверсии углекислого газа:

Используем соотношение для температуры инверсии:

$$\begin{cases} T_{inv1} = \frac{2a_1}{Rb_1} \approx 1183 \\ T_{inv2} = \frac{2a_2}{Rb_2} \approx 1247 \end{cases} \quad (11)$$

5 Итоги

В работе мы измерили коэффициенты Джоуля-Томсона при разных температурах и постоянные Вандер-Ваальса для углекислого газа. Погрешности оказались большими (порядка измеряемой величины) из-за особенностей расчётной формулы.

References

- [1] Под редакцией проф. А.Д. Гладуна - Лабораторный практикум по общей физике. Термодинамика. Том 1