

# Эффект Джоуля-Томсона (2.1.6)

Павлушкин Вячеслав

16 мая 2022 г.

## 1 Аннотация

В данной работе исследуется изменение температуры идеального газа при его течении по трубке с пористой перегородкой.

## 2 Введение

**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, трубка Дьюара, термостат, термометры, дифференциальная термопара, микровольтметр, балластный баллон, манометр. Эффектом Джоуля-Томсона называется изменение температуры газа, медленно протекающего из области высокого в область низкого давления в условиях хорошей тепловой изоляции.

## 3 Теоретические сведения

Рассматривая 2 произвольных сечения записываем уравнение

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

Учитывая некоторые формулы мы получаем, что

$$\mu_{D-T} = \frac{\Delta T}{\Delta P} \approx \frac{\frac{2a}{RT} - b}{C_p} \quad (1)$$

### 3.1 Определение коэффициента Джоуля-Томсона

Проведём измерение зависимости  $\Delta T$  от  $\Delta P$  для разных значений температур. Полученные значения заносим в таблицы. При записи полученных данных также учитываем, что чувствительность термопары медь – константан зависит от температуры. При вычислении будем использовать следующую формулу:

$$\Delta T = \frac{U}{\alpha},$$

где

$$\alpha_{20^\circ C} = 40,2 \text{ мкВ}/^\circ C, \quad \alpha_{30^\circ C} = 41,1 \text{ мкВ}/^\circ C, \quad \alpha_{50^\circ C} = 42,9 \text{ мкВ}/^\circ C.$$

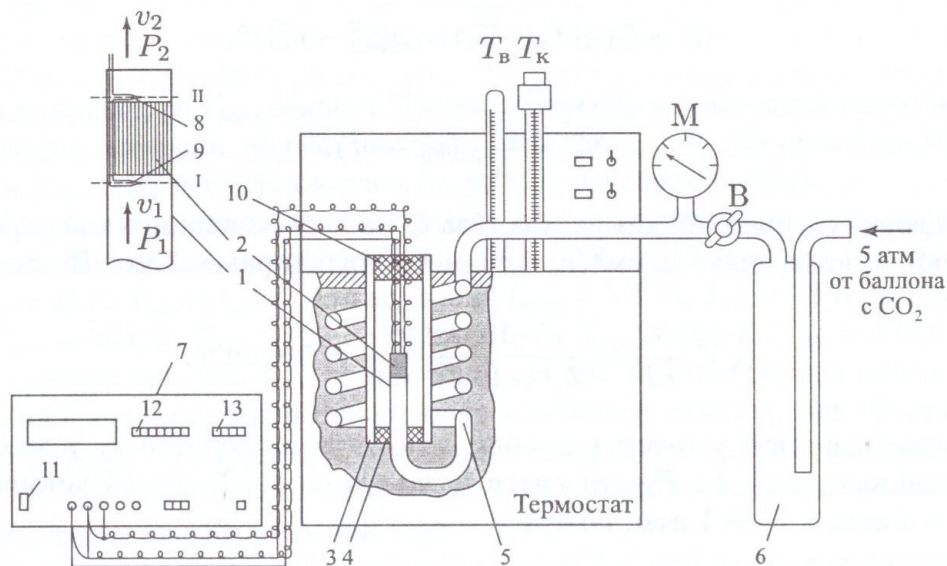


Рис. 1. Схема установки для изучения эффекта Джоуля–Томсона

$T = 22.1\text{ }^{\circ}\text{C}$		
$\Delta P$ , атм	$U$ , мВ	$\Delta T$ , К
4	0.141	3.46
3.5	0.118	2.90
3	0.096	2.36
2	0.058	1.43

$T = 30.1\text{ }^{\circ}\text{C}$		
$\Delta P$ , атм	$U$ , мВ	$\Delta T$ , К
4	0.134	3.30
3.5	0.112	2.78
3	0.089	2.21
2	0.055	1.37

$T = 45.1\text{ }^{\circ}\text{C}$		
$\Delta P$ , атм	$U$ , мВ	$\Delta T$ , К
4	0.109	2.56
3.5	0.089	2.09
3	0.074	1.74
2.3	0.050	1.18

$T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$		
$\Delta P$ , атм	$U$ , мВ	$\Delta T$ , К
4	0.066	1.62
3.6	0.057	1.40
3.1	0.047	1.15
2.2	0.030	0.74

Таблица 1: Экспериментальные данные для разных температур

Кроме того, при вычислении  $\Delta T$  погрешность определяем по формуле:  $\sigma_{\Delta T} = \Delta T \frac{\sigma_U}{U}$ . Систематические погрешности:  $\sigma_P = 0.05$  атм,  $\sigma_U = 0.001$  мВ.

По имеющимся данным проведем аппроксимацию зависимости  $\Delta T$  от  $\Delta P$ , чтобы определить коэффициент Джоуля–Томсона. На рисунке ?? изображены графики зависимостей.

Вычислим  $\mu_{\text{Д-Т}} = \frac{dT}{dP}$ , используя метод наименьших квадратов.

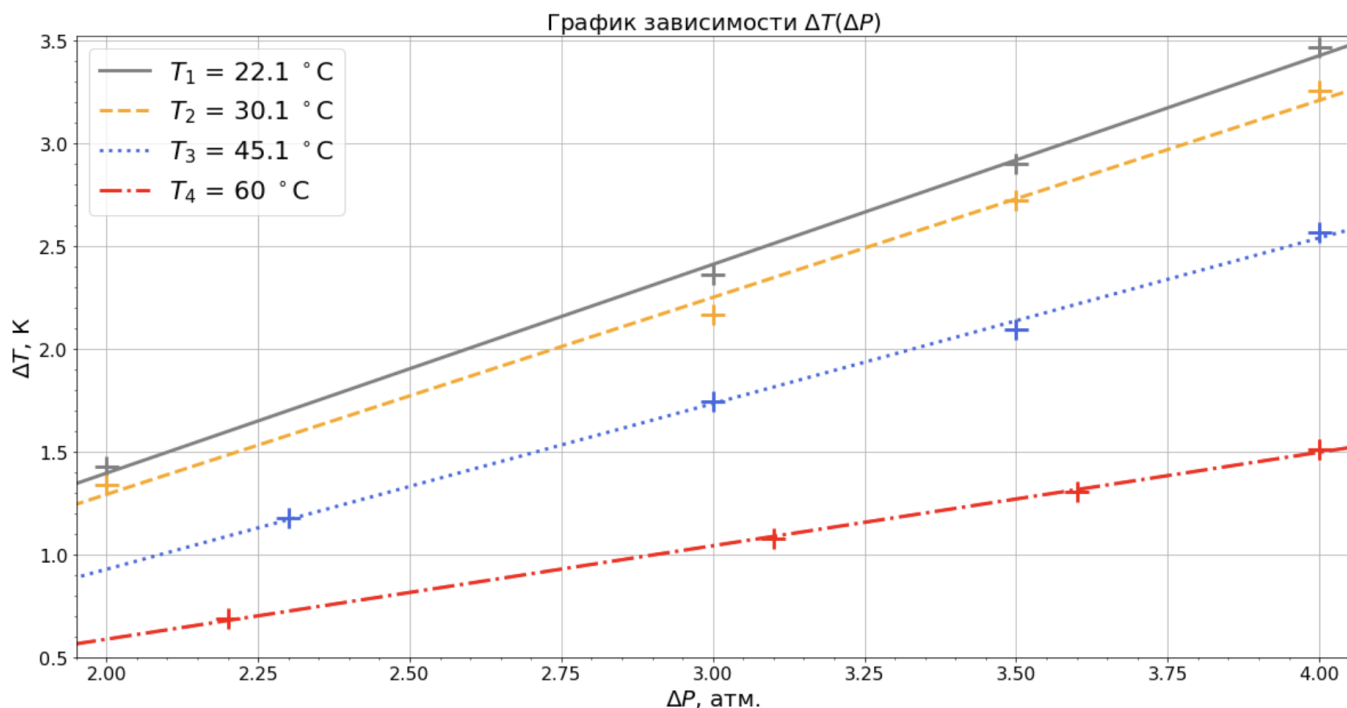
Систематические погрешности оценим по следующим формуле:

$$\sigma_{\mu_{\text{Д-Т}}}^{\text{сист}} = \mu_{\text{Д-Т}} \sqrt{\varepsilon_{\Delta P}^2 + \varepsilon_{\Delta T}^2}.$$

Таким образом, полная погрешность измерения определяется следующим соотношением:

$$\sigma_{\mu_{\text{Д-Т}}} = \sqrt{(\sigma_{\mu_{\text{Д-Т}}}^{\text{сист}})^2 + (\sigma_{\mu_{\text{Д-Т}}}^{\text{случ}})^2}.$$

Результаты вычислений заносим в таблицу 2.



$T, ^\circ\text{C}$	$\mu_{\text{Д-Т}}, \text{K/атм}$	$\sigma_{\mu_{\text{Д-Т}}}, \text{K/атм}$	$\varepsilon, \%$
22.1	1.015	0.053	5.2
30.1	0.9582	0.065	6.7
45.1	0.8057	0.043	5.3
60	0.488	0.023	4.7

Таблица 2: Результаты измерений  $\mu_{\text{Д-Т}}$

## 3.2 Вычисление параметров газа Ван-дер-Ваальса

Вычислим параметры газа Ван-дер-Ваальса, используя коэффициенты  $\mu_{\text{Д-Т}}$ , полученные в 3.1, для разных пар температур.

Пользуясь формулой (1), получим

$$\begin{cases} a = \frac{(\mu_1 - \mu_2) C_P R T_1 T_2}{2(T_2 - T_1)}, \\ b = \frac{C_P(\mu_2 T_2 - \mu_1 T_1)}{T_1 - T_2}. \end{cases}$$

Погрешности этих вычислений можно оценить используя следующие формулы:

$$\sigma_a = a \sqrt{\varepsilon_{\mu_1 - \mu_2}^2 + \varepsilon_{T_1}^2 + \varepsilon_{T_2}^2 + \varepsilon_{T_2 - T_1}^2},$$

$$\sigma_b = b \sqrt{\varepsilon_{\mu_2 T_2 - \mu_1 T_1}^2 + \varepsilon_{T_1 - T_2}^2},$$

где

$$\sigma_{x \pm y} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}.$$

Для температур 22.1°C и 30.1°C, а также для 45.1°C и 60°C, вычисляем параметры «a» и «b» газа Ван-дер-Ваальса. Результаты вычислений заносим в таблицу 3.

$T, ^\circ C$	$a, \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{моль}^2}$	$\sigma_a, \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{моль}^2}$	$\varepsilon_a, \%$	$b \cdot 10^{-4}, \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$	$\sigma_b \cdot 10^{-4}, \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$	$\varepsilon_b, \%$
30.1 – 22.1	0.97	1.46	150	4.16	7.57	182
45.1 – 30.1	1.49	0.76	51.1	8.33	5.26	63.1
60 – 45.1	3.43	0,55	16.1	23.0	5.59	24.3

Таблица 3: Результаты измерения параметров газа Ван-дер-Ваальса

Сверим полученные результаты с табличными. Согласно справочнику для углекислого газа

$$a = 0,36 \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{моль}^2},$$

$$b = 0,42 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}.$$

Полученные данные значительно отличаются от табличных. Про причины такого различия сказано в выводе.

### 3.3 Вычисление температуры инверсии

Используя формулу  $T_{\text{инв}} = 27 \setminus 4T_{\text{кр}}$ , по полученным параметрам газа Ван-дер-Ваальса вычислим  $T_{\text{инв}}$ . Также оценим погрешность по следующей формуле:

$$\sigma_{T_{\text{инв}}} = T_{\text{инв}} \sqrt{\varepsilon_a^2 + \varepsilon_b^2}.$$

Результаты вычислений занесём в таблицу 4.

$T, ^\circ C$	$T_{\text{инв}}, ^\circ K$	$\sigma_{T_{\text{инв}}}, ^\circ K$	$\varepsilon, \%$
30-20	489	396	81
50-30	485	219	45

Таблица 4: Результаты вычисления температуры инверсии

Для углекислого газа, согласно справочнику

$$T_{\text{инв}} = 2053 \text{ K}.$$

Полученные результаты снова сильно отличаются от табличных.

## 4 Обсуждение результатов и выводы

В ходе выполнения работы мы:

- экспериментальным методом измерили коэффициенты газа Ван-дер-Ваальса «а» и «b»;
- вычислили  $T_{\text{инв}}$  для углекислого газа.

В ходе работы мы получили значения, очень сильно отличающиеся от табличных. Погрешность вычисления параметров газа Ван-дер-Ваальса составила десятки процентов. Такая большая ошибка может говорить нам о неприменимости уравнения Ван-дер-Ваальса в условия лабораторной работы. Действительно, это уравнение используется лишь для качественного описания процессов, происходящих с реальными газами. Количественный подход к этому уравнению неприменим.

Также для увеличения точности измерений можно использовать более точные методы измерения температуры. Повысить точность необходимо как у термостата, так и у вольтметра, т.к. температура на них колебалась на протяжении эксперимента, несмотря на то, что условия оставались неизменными.