

# Работа 2.1.6

## Эффект Джоуля-Томсона

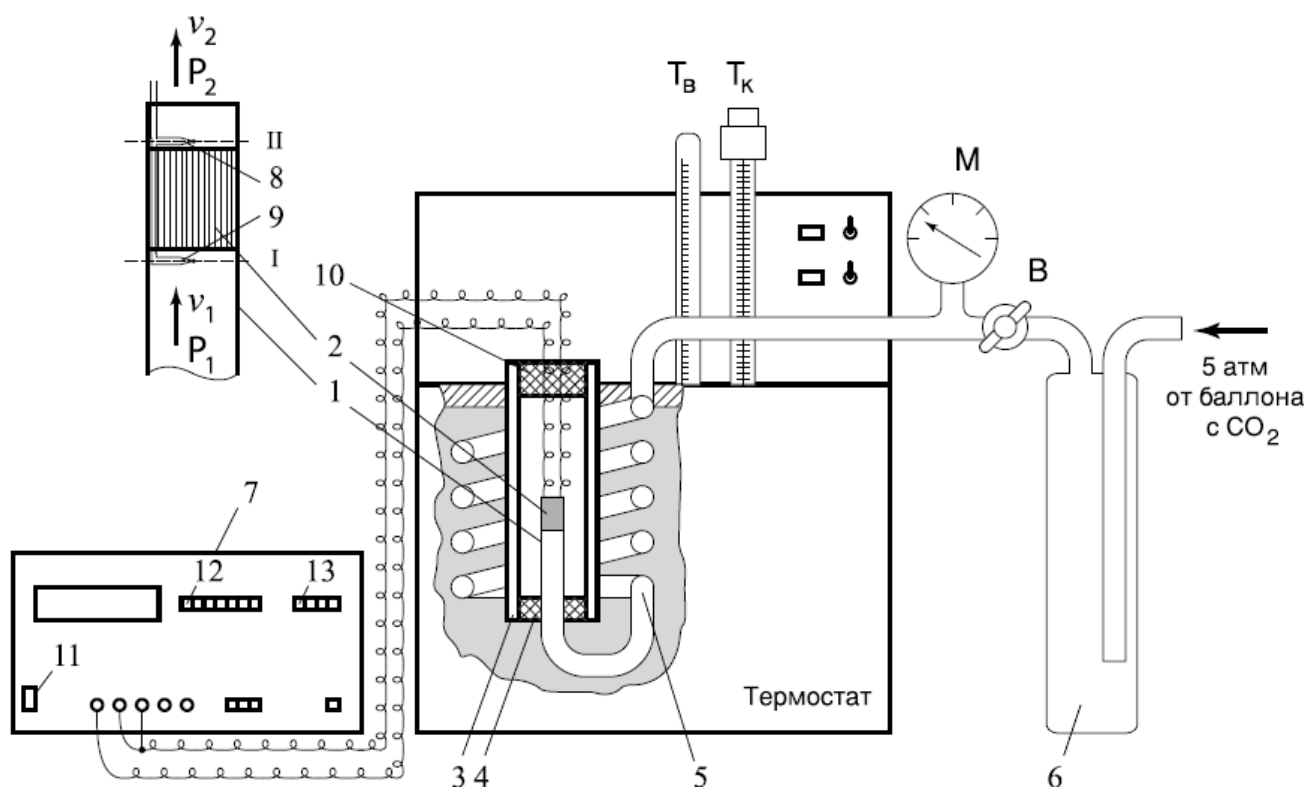
Гаврилин Илья Дмитриевич  
Б01-101

12 мая 2022 г.

### 1 Аннотация

В данной работе было изучено прохождение газа через пористую губку и наблюдение эффекта Джоуля-Томсона. Были получены значения коэффициентов Джоуля-Томсона ( $\mu_{\text{д-т.}}$ ) для различных значений температур. Также были оценены коэффициенты  $a$  и  $b$  в формуле Ван-дер-Ваальса и  $T_{\text{инв}}$  - температура смены знака эффекта Джоуля-Томсона. Оценены погрешности полученных величин.

### 2 Теоретические сведения



### Теоретическая часть

В работе исследуется изменение температуры углекислого газа при медленном его течении по трубке с пористой перегородкой. Трубка 1 хорошо теплоизолирована. Газ из области повышенного давления  $P_1$  проходит через множество узких и длинных каналов пористой перегородки 2 в область с

атмосферным давлением  $P_2$ . Перепад давления  $\Delta P = P_1 - P_2$  из-за большого сопротивления каналов может быть заметным даже при малой скорости течения газа в трубке. Величина эффекта Джоуля–Томсона определяется по разности температуры газа до и после перегородки.

Рассмотрим стационарный поток газа между произвольными сечениями I и II трубки (до перегородки и после нее). Пусть, для определенности, через трубку прошел 1 моль углекислого газа;  $\mu$  — его молярная масса. Молярные объемы газа, его давления и отнесенные к молю внутренние энергии газа в сечениях I и II обозначим соответственно  $V_1, P_1, U_1$  и  $V_2, P_2, U_2$ . Для того чтобы ввести в трубку объем  $V_1$ , над газом нужно совершить работу  $A_1 = P_1 V_1$ . Проходя через сечение II, газ сам совершает работу  $A_2 = P_2 V_2$ . Так как через боковые стенки не происходит ни обмена теплом, ни передачи механической энергии, то

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

В уравнении (1) учтено изменение как внутренней (первые члены в скобках), так и кинетической (вторые члены в скобках) энергии газа. Подставляя в (1) написанные выражения для  $A_1$  и  $A_2$  и перегруппировывая члены, найдем

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

Сделаем несколько замечаний. Прежде всего отметим, что в процессе Джоуля–Томсона газ испытывает в пористой перегородке существенное трение, приводящее к ее нагреву. Потери энергии на нагрев трубки в начале процесса могут быть очень существенными и сильно искажают ход явления. После того как температура трубки установится и газ станет уносить с собой все выделенное им в пробке тепло, формула (1) становится точной, если, конечно, теплоизоляция трубки достаточно хороша и не происходит утечек тепла наружу через ее стенки.

Второе замечание связано с правой частью (2). Процесс Джоуля–Томсона в чистом виде осуществляется лишь в том случае, если правой частью можно пренебречь, т. е. если макроскопическая скорость газа с обеих сторон трубки достаточно мала. У нас сейчас нет критерия, который позволил бы установить, когда это можно сделать. Поэтому мы отложим на некоторое время обсуждение вопроса о правой части (2), а пока будем считать, что энтальпия газа не меняется.

Рассмотрим выражение:

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

Из формулы (3) видно, что эффект Джоуля–Томсона для не очень плотного газа зависит от соотношения величин  $a$  и  $b$ , которые оказывают противоположное влияние на знак эффекта. Если силы взаимодействия между молекулами велики, так что превалирует «поправка на давление», то основную роль играет член, содержащий  $a$ , и

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} > 0,$$

то есть газ при расширении охлаждается ( $\Delta t < 0$  так как всегда  $\Delta P < 0$ ). В обратном случае (малые  $a$ ):

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} < 0,$$

то есть газ нагревается ( $\Delta t < 0$  так как по-прежнему  $\Delta P < 0$ ).

Как следует из формул, при температуре  $T_i$  коэффициент  $\mu_{\text{Д-Т}}$  обращается в нуль. Используя связь между коэффициентами  $a$  и  $b$  и критической температурой, найдем:

$$T_{\text{инв}} = \frac{27}{4} T_{\text{кр}} \quad (4)$$

:

При температуре  $T_{\text{инв}}$  эффект Джоуля–Томсона меняет знак: ниже температуры инверсии эффект положителен ( $\mu_{\text{Д-Т}} > 0$ , газ охлаждается), выше  $T_{\text{инв}}$  эффект отрицателен ( $\mu_{\text{Д-Т}} < 0$ , газ нагревается).

### 3 Ход работы

Подготовим установку к работе, прогреем термостат, откроем кран с углекислотой и дождемся установления показаний на вольтметре.

Мы знаем, что чувствительность термопары зависит от температуры, в данной таблицы указаны интервалы в 10 градусов, поэтому позволю себе предположить, что зависимость от температуры можно аппроксимировать линейной функцией, построим такой график и определим функцию для расчета чувствительности при конкретной температуре.

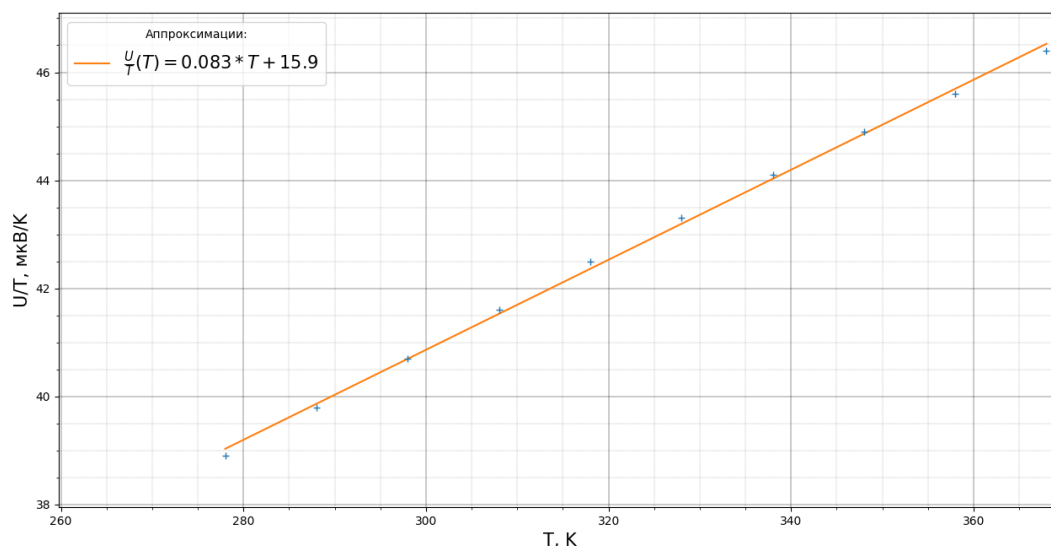


Рис. 1: Зависимость чувствительности термопары от температуры

Зависимость действительно в наших пределах температуры может быть аппроксимирована прямой. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать чувствительность термопары как функцию температуры.

Тогда проведем замеры для 4 значений температуры (В ходе опытов паразитное эдс было равно  $U_0 = 0.002$  мВ):

T = 293.2 K					
$\Delta P, \text{кгс/см}^2$	4	3.5	3	2.5	2
$U - U_0, \text{мВ}$	-0.163	-0.14	-0.117	-0.092	-0.072
$\Delta T, K$	4.045	3.474	2.903	2.283	1.787
T = 303.1 K					
$\Delta P, \text{кгс/см}^2$	4	3.5	3	2.5	2
$U - U_0, \text{мВ}$	-0.145	-0.124	-0.100	-0.082	-0.059
$\Delta T, K$	3.526	3.015	2.432	1.994	1.435
T = 313.1 K					
$\Delta P, \text{кгс/см}^2$	4	3.5	3	2.5	2
$U - U_0, \text{мВ}$	-0.120	-0.097	-0.070	-0.059	-0.042
$\Delta T, K$	2.860	2.312	1.668	1.406	1.001
T = 323 K					
$\Delta P, \text{кгс/см}^2$	4	3.5	3	2.5	2
$U - U_0, \text{мВ}$	-0.106	-0.080	-0.061	-0.044	-0.032
$\Delta T, K$	2.478	1.870	1.426	1.029	0.748

Таблица 1: Зависимость разницы температур от избыточного давления

Погрешность определения температуры оценим как:  $\sigma(U) = 0.001 \text{ мВ}$ ;  $\sigma(\Delta T) = 0.024 \text{ К}$ . Так как, расчет температуры связан только с погрешностью определения напряжения вольтметром. Определить погрешность чувствительности термопары оценить не представляется возможным. Построим график зависимости  $\Delta T(\Delta P)$ . Перед подстановкой давления проведем его перевод из  $\text{кгс/см}^2$  в  $\text{атм}$ .

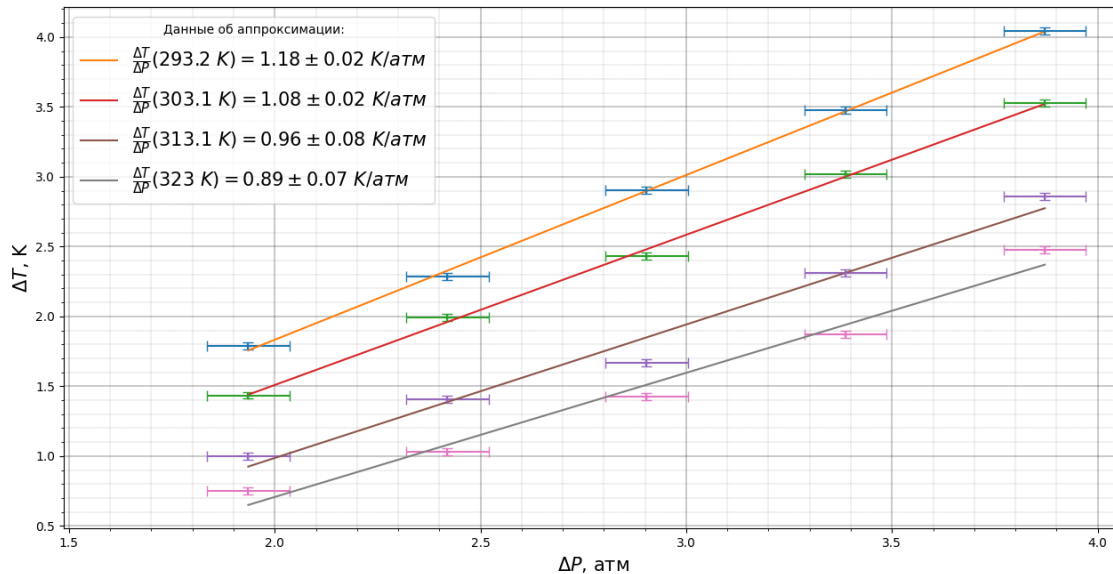


Рис. 2: Зависимость разности температур от избыточного давления

Итого получили:

T, K	293.2	303.1	313.1	323
$\mu_{\text{д-т.}}$	$1.18 \pm 0.02$	$1.08 \pm 0.02$	$0.96 \pm 0.08$	$0.89 \pm 0.07$

Таблица 2: Коэффициент Джоуля-Томсона для углекислого газа при различных температурах

Так как в соответствии формулы (3) коэффициент Джоуля-Томсона обратно пропорционален температуре, для нахождения коэффициентов а, b Ван-дер-Ваальса построим график  $\mu_{д-т.}(T) = \frac{K}{T} - B$ , с помощью МНК определим К, В.

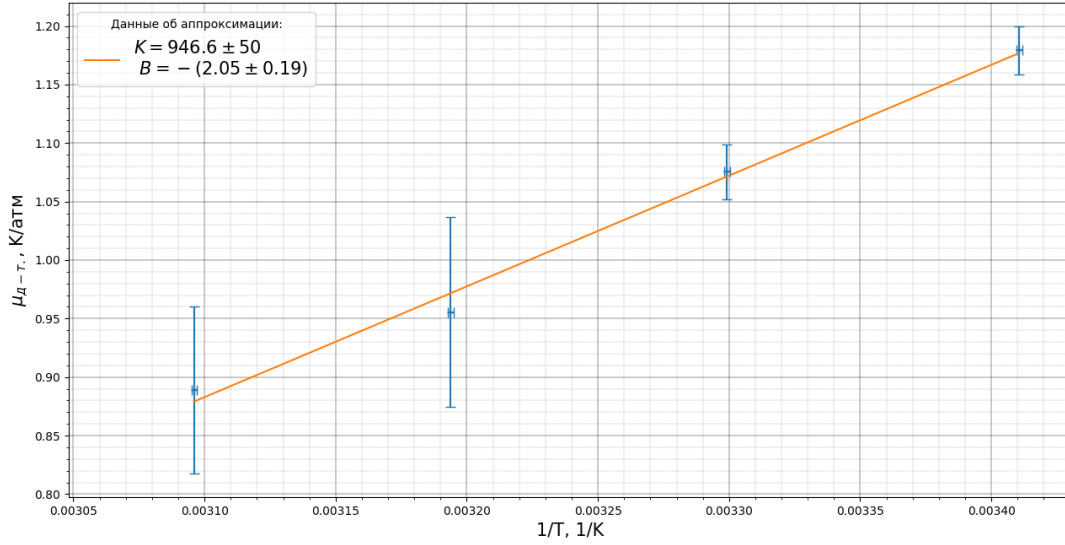


Рис. 3: Зависимость коэффициента Джоуля-Томсона от обратной температуры

Учтем, что коэффициенты К, В определены для давления в атмосферах, при расчете а, b,  $T_i$  переведем единицы измерения. Тогда определим коэффициенты а, b и температуру инверсии:

$$C_p = 41 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

$$a = \frac{KRC_p}{2} = 1.61 \pm 0.08 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{моль}^2}$$

$$b = -BC_p = (8.4 \pm 0.4) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}.$$

$$T_i = \frac{2a}{Rb} = 461 \pm 32K$$

Табличное значение:

$$T_{i_{\text{табл}}} = 2027K$$

## 4 Выводы

- 1) В ходе работы получили значения а, b и  $T_i$  и их погрешности (смотри расчеты выше).
- 2) Табличные значения коэф-тов Ван-дер-Ваальса:  $a_{\text{табл}} = 0.36 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{моль}^2}$ ;  $b_{\text{табл}} = 0.42 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$ . Заметим что полученные нами значения не попадают в погрешность. Можно сделать вывод, что несовпадение вызвано методом замеров в котором сложно пренебречь трением молекул, скоростью молекул при выходе, нестационарностью термостата, малым числом замеров.
- 3) Также измеряемый нами диапазон много меньше  $T_{i_{\text{табл}}} = 2027K$ , поэтому замеры коэффициентов а, b могут быть не точными.