

Лабораторная работа №2.1.6
Эффект Джоуля-Томсона

Струков Олег
Б04-404

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.

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

Теоретическая часть

Эффект Джоуля–Томсона для газа Ван-дер-Ваальса

Эффектом Джоуля–Томсона называется изменение температуры газа, медленно протекающего из области высокого в область низкого давления в условиях хорошей тепловой изоляции. В разреженных газах, которые приближаются по своим свойствам к идеальному газу, при таком течении температура газа не меняется. Эффект Джоуля–Томсона демонстрирует отличие исследуемого газа от идеального.

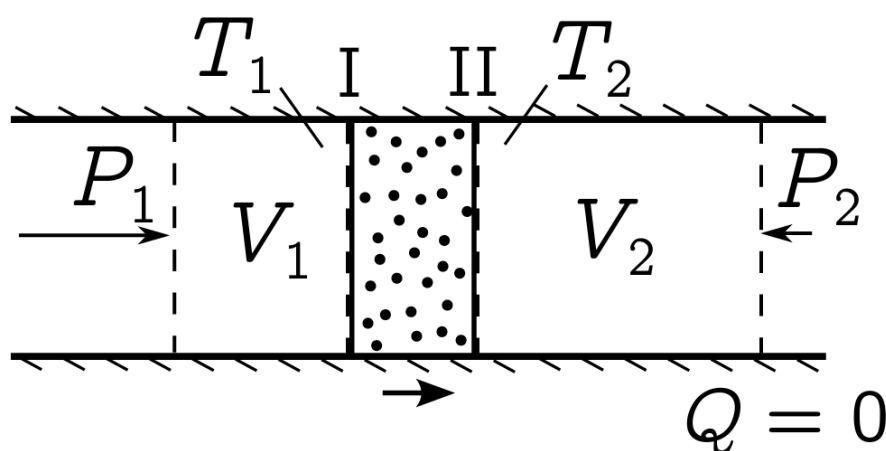


Рис. 1: Принципиальная схема эффекта Джоуля–Томсона

Рассмотрим стационарное течение одного моля газа в теплоизолированной трубке постоянного сечения на участках до и после пористой перегородки. Для ввода в трубку начального объема (молярного) газа V_1 необходимо совершить работу $A_1 = P_1 V_1$, где P_1 - начальное давление. Проходя через сечение на втором участке, газ сам совершает работу $A_2 = P_2 V_2$, где P_2 и V_2 - давление и молярный объем газа соответственно после прохождения перегородки. Пусть U_1 , U_2 , v_1 и v_2 - внутренняя энергия и скорости газа до и после прохождения перегородки соответственно. Тогда, учитывая отсутствие теплопотерь,

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

где μ - молярная масса газа. Перепишем это соотношение через энтальпию $H = U + PV$:

$$H_1 - H_2 = \frac{1}{2} \mu (v_2^2 - v_1^2).$$

Величина, стоящая в правой части уравнения, в данном опыте, достаточно мала: $v_2 \approx 1,4$ м/с, $v_1 > 0,25v_2$, $\mu_{\text{CO}_2} = 0,044$ кг/моль, откуда $\mu(v_2^2 - v_1^2)/2 < 3 \cdot 10^{-2}$ Дж, поэтому можно считать энтальпию в данном процессе постоянной.

Рассмотрим дифференциальный эффект Джоуля–Томсона, т. е. когда изменения давления и температуры малы. В этом случае коэффициент Джоуля–Томсона $\mu_{\text{д-т}}$ равен

$$\mu_{\text{д-т}} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H. \quad (1)$$

Одна из моделей реальных газов - модель газа Ван-дер-Ваальса. Для него уравнения состояния имеет вид

$$(P - \frac{a}{V^2})(V - b) = RT,$$

где a и b - коэффициенты Ван-дер-Ваальса, принятые постоянными. Подставляя данное соотношение в выражение (1), дифференцируя и используя выражение для теплоёмкости $C_P = (\partial H / \partial T)_P$, после преобразований получим

$$\mu_{д-т} = \frac{(2a/RT) - b}{C_P}. \quad (2)$$

Температура инверсии

Из формулы (2) видно, что эффект Джоуля–Томсона для не очень плотного газа зависит от соотношения параметров a и b , которые оказывают противоположное влияние на знак эффекта. Если силы притяжения между молекулами велики, то основную роль играет член, содержащий a , и газ при расширении охлаждается: $\Delta T < 0$. В обратном случае, когда доминирует отталкивание, т.е. слагаемое b , газ нагревается: $\Delta T > 0$. Видно также, что существует температура инверсии эффекта Джоуля–Томсона

$$T = \frac{2a}{Rb}, \quad (3)$$

при прохождении через которую эффект меняет знак. Газ нагревается ($\mu < 0$, $\Delta T > 0$) при $T > T_{инв}$ и охлаждается ($\mu > 0$, $\Delta T < 0$) при $T < T_{инв}$. Для используемого в работе углекислого газа температура инверсии $T_{инв} \sim 1500$ К (при $P \sim 1$ атм), и при комнатной температуре он будет охлаждаться. Среди всех газов только у гелия ($T_{инв} = 46$ К) и водорода ($T_{инв} = 205$ К) температура инверсии значительно ниже комнатной, поэтому они при обычных температурах при дросселировании нагреваются.

Экспериментальная установка

Использованная в работе экспериментальная установка изображена на рис. 2. 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 $d = 3$ 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 $\Delta P = 4$ атм (расход газа составляет около 10 см³/с); при этом в результате эффекта Джоуля–Томсона создается достаточная разность температур.

Углекислый газ под повышенным давлением поступает 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_v , помещенным в термостате. Требуемая температура воды устанавливается и поддерживается во время эксперимента при помощи контактного термометра T_k . Давление газа в трубке измеряется манометром M и регулируется вентилем B (при открывании вентиля B , т. е. при повороте ручки против часовой стрелки, давление P_1 повышается). Манометр M 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.

Разность температур газа до перегородки и после неё измеряется дифференциальной термопарой медь — константан. Константановая проволока диаметром 0,1 мм соединяет спаи 8 и 9, а

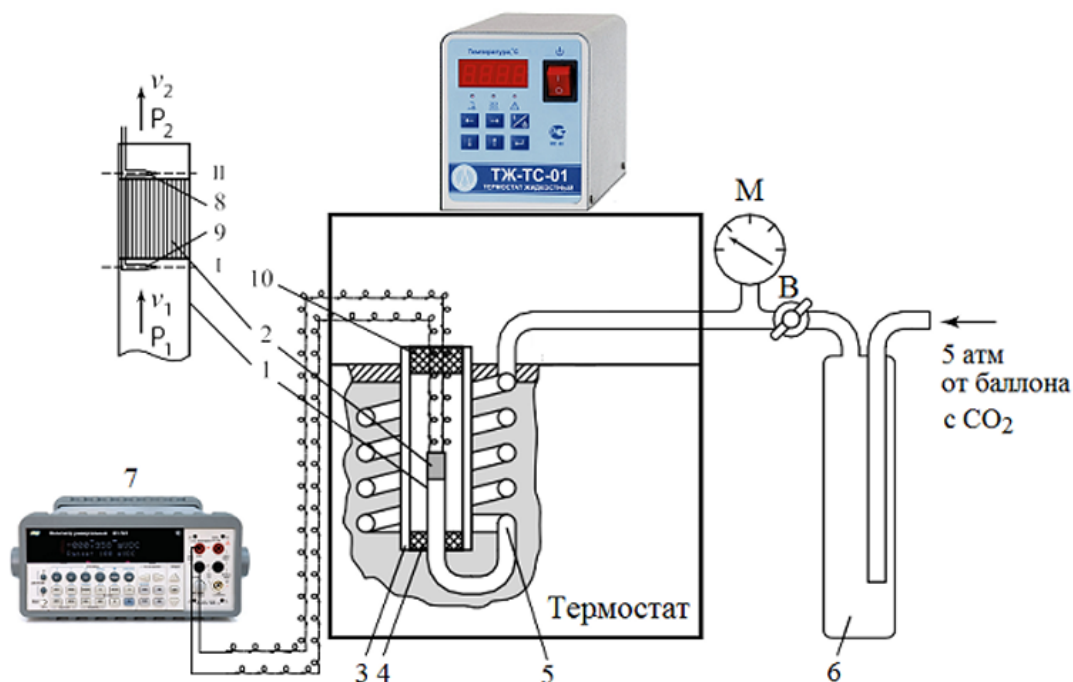


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

Чувствительность медно-константановой термопары

Температура t_0 , °C	0–10	10–20	20–30	30–40	40–50
Чувствительность $\frac{dV}{dt}$, мкВ/°C	39,1	39,8	40,7	41,5	42,4
Температура t_0 , °C	50–60	60–70	70–80	80–90	90–100
Чувствительность $\frac{dV}{dt}$, мкВ/°C	43,2	44,1	44,9	45,6	46,4

Рис. 3: Чувствительность медно-константановой термопары

медные проволоки (того же диаметра) подсоединены к цифровому вольтметру 7. Отвод тепла через проволоку столь малого сечения пренебрежимо мал. Таблица зависимости разности температур от разности показаний вольтметра изображена на рис. 3. Для уменьшения теплоотвода трубка с пористой перегородкой помещена в трубу Дьюара 3, стенки которой посеребрены, для уменьшения теплоотдачи, связанной с излучением. Для уменьшения теплоотдачи за счет конвекции один конец трубы Дьюара уплотнен кольцом 4, а другой закрыт пробкой 10 из пенопласта. Такая пробка практически не создает перепада давлений между внутренней полостью трубы и атмосферой.

Ход работы

1. В начале работы были включены все приборы. При отсутствии потока газа показания вольтметра составляли $[-0,001, 0,001]$ мВ, поэтому в получаемых значениях их можно не учитывать.
2. Было проведено ознакомление с манометром: его цена деления составляет 0,1 бар, предел измерений – 6 бар.
3. Далее был открыт вентиль В настолько, чтобы избыточное давление составило $\Delta P \approx 4$ бар, после этого было выждено около семи минут для завершения переходных процессов, и когда показания вольтметра перестали изменяться, было записано полученное значение.
4. После этого устанавливалось давление на 0,3 – 0,5 бар меньше, выжидалось около трёх - пяти минут и снималось полученное значение напряжения.
5. Данные действия были проведены шестикратно для четырёх различных температур. Разность потенциалов ΔU на спаях термопары была переведена в разность температур ΔT на них с помощью значений градуировочных кривых, с помощью МНК были найдены коэффициенты наклона $\Delta U/\Delta T$ прямых изучаемых зависимостей $\Delta T(\Delta P)$, равные коэффициенту Джоуля-Томсона μ . Результаты представлены в таблицах:

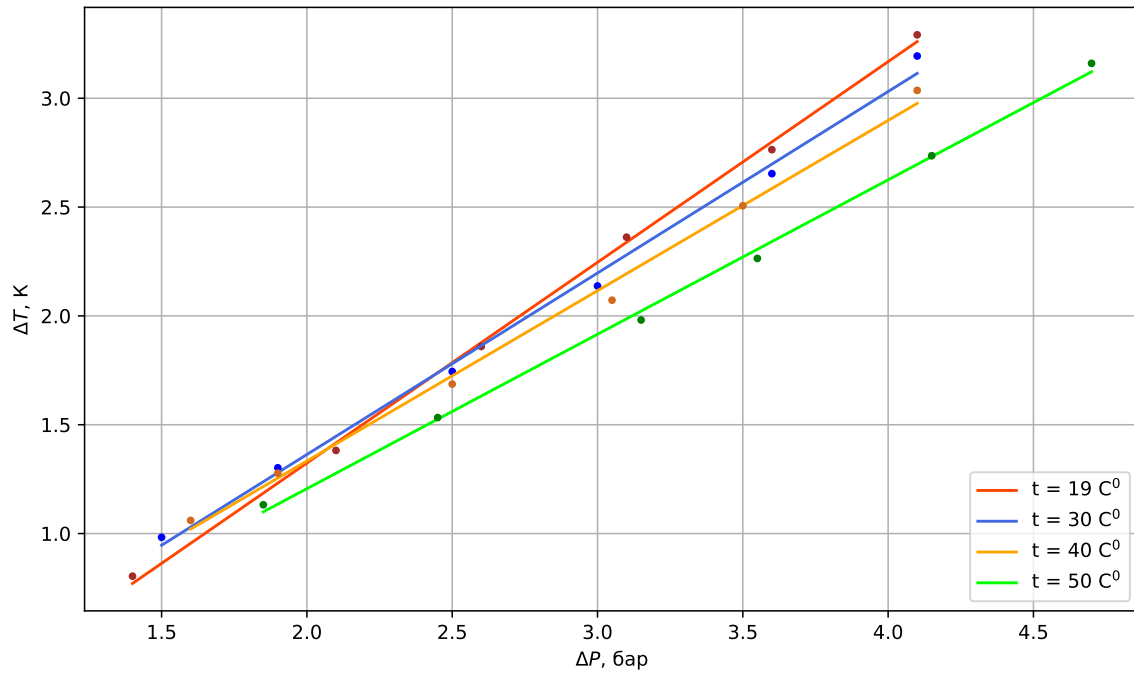
	ΔP , бар	ΔU , мВ	ΔT , К
T, $^{\circ}C$	4,1	0,131	3,291
19	3,6	0,11	2,764
$\Delta U/\Delta T$, мВ/К	3,1	0,094	2,362
39,8	2,6	0,074	1,859
μ , К/бар	2,1	0,055	1,382
0,922	1,4	0,032	0,804

	ΔP , бар	ΔU , мВ	ΔT , К
T, $^{\circ}C$	4,1	0,13	3,194
30	3,6	0,108	2,654
$\Delta U/\Delta T$, мВ/К	3	0,087	2,138
39,8	2,5	0,071	1,744
μ , К/бар	1,9	0,053	1,302
0,834	1,5	0,04	0,983

	ΔP , бар	ΔU , мВ	ΔT , К
T, $^{\circ}C$	4,1	0,126	3,036
40	3,5	0,104	2,506
$\Delta U/\Delta T$, мВ/К	3,05	0,086	2,072
41,5	2,5	0,07	1,687
μ , К/бар	1,9	0,053	1,277
0,782	1,6	0,044	1,060

	ΔP , бар	ΔU , мВ	ΔT , К
T , $^{\circ}C$	4,7	0,134	3,160
50	4,15	0,116	2,736
$\Delta U/\Delta T$, мВ/К	3,55	0,096	2,264
42,4	3,15	0,084	1,981
μ , К/бар	2,45	0,065	1,533
0,709	1,85	0,048	1,132

6. Зависимости $\Delta T(\Delta P)$ для каждой исследуемой температуры были изображены на графике. Видно, что зависимость $\Delta T(\Delta P)$ является линейной.



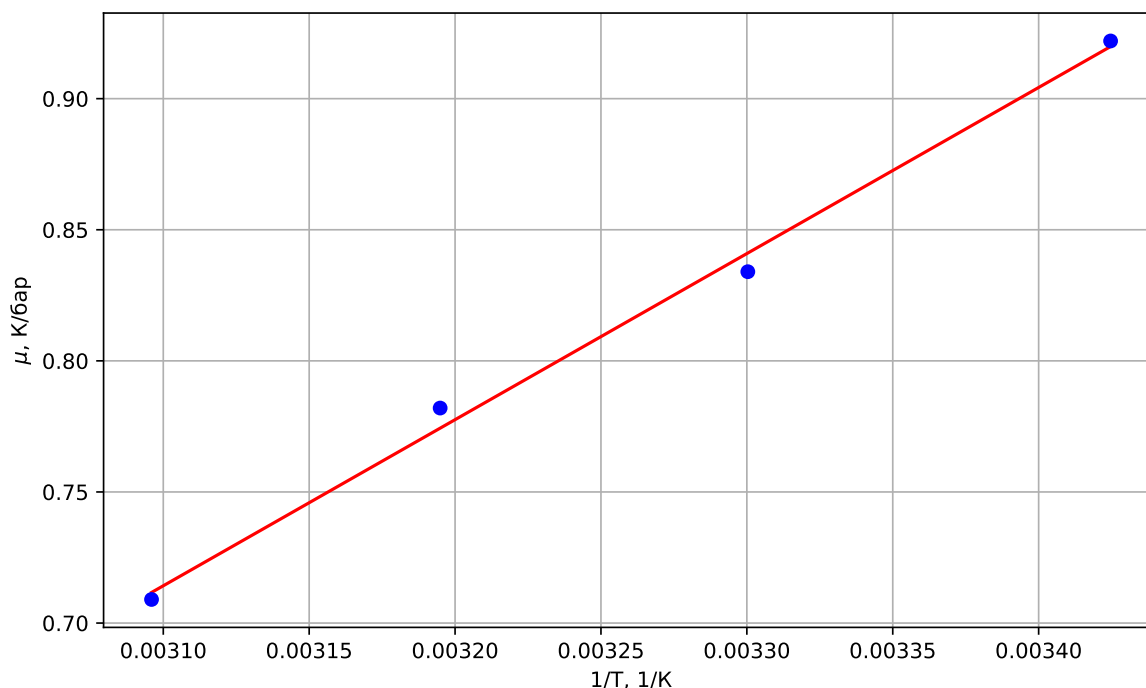
7. Был построен график зависимости $\mu(1/T)$, полученные точки также лежат на одной прямой. Чтобы определить коэффициенты a и b в уравнении состояния газа Ван-дер-Ваальса, необходимо объединить выражения (2) для двух температур газа в систему:

$$\begin{cases} \mu_1 = \frac{(2a/RT_1) - b}{C_P}; \\ \mu_2 = \frac{(2a/RT_2) - b}{C_P}. \end{cases}$$

Отсюда выводятся выражения для искомых коэффициентов:

$$\begin{cases} a = \frac{C_P R}{2} \cdot \frac{\mu_1 - \mu_2}{T_1^{-1} - T_2^{-1}}; \\ b = \frac{C_P(\mu_2 T_2 - \mu_1 T_1)}{T_1 - T_2}. \end{cases}$$

Также по формуле (3) для каждой пары коэффициентов a и b была найдена температура инверсии. В таблице ниже представлены полученные результаты.



$t_1, ^\circ C$	$t_2, ^\circ C$	$a, \text{Па}\cdot\text{м}^6/\text{моль}^2$	$b, 10^{-4} \text{ м}^3/\text{моль}$	$T_{\text{инв}}$
19	30	1,09	5,57	471,2
19	40	0,94	4,32	523,2
19	50	1,00	4,81	499,5
30	40	0,76	2,94	621,4
30	50	0,94	4,40	516,3
40	50	1,14	5,85	468,3

Усреднённые результаты: $a = 0,98 \text{ Па}\cdot\text{м}^6/\text{моль}^2$, $b = 4,65 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{моль}$, $T_{\text{инв}} = 516,7 \text{ К}$.

Табличные значения для углекислого газа составляют $a = 0,365 \text{ Па}\cdot\text{м}^6/\text{моль}^2$, $b = 4,28 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{моль}$, $T_{\text{инв}} \approx 2000 \text{ К}$.

Вывод

В результате выполнения работы был исследован эффект Джоуля-Томсона для углекислого газа, получены зависимости $\Delta T(\Delta P)$ для четырёх различных температур, определены коэффициенты Джоуля-Томсона для каждой из них, найдены коэффициенты a и b уравнения и температура инверсии.

Из полученных значений с табличными более-менее точно совпал только коэффициент уравнения b , и коэффициент a совпал только по порядку. Температура инверсии от табличной отличается примерно в четыре раза, из чего можно сделать вывод, что данный способ изучения параметров газа при температурах, близких к комнатной и его критической температуре (304,15 К для углекислого газа), не даёт точных результатов.

Однако данный опыт даёт возможность исследовать газ качественно и убедиться в том, что он действительно охлаждается при дросселировании при температурах меньших его температуры инверсии.