

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа прикладной математики и информатики

Отчёт о выполнении лабораторной работы

2.1.6

Эффект Джоуля-Томсона

Автор:
Вронский Александр Сергеевич
Б05-226

Долгопрудный
16 апреля 2024 г.

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 a , b уравнения состояния Ван-дер-Ваальса.

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

1 Теоретические сведения

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.

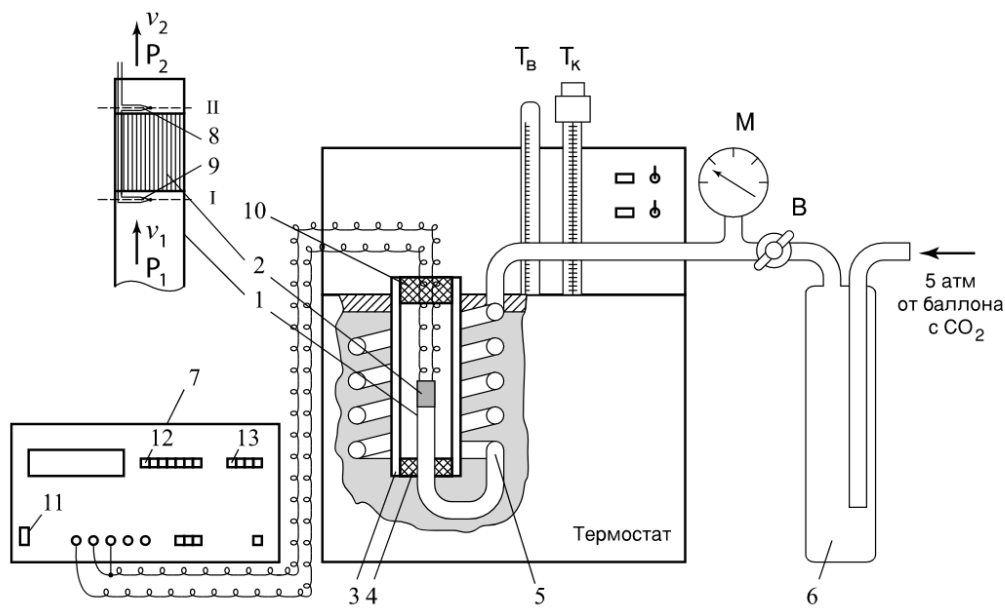


Рис. 1: Схема установки для изучения эффекта Джоуля–Томсона

В работе исследуется изменение температуры углекислого газа при медленном его течении по трубке с пористой перегородкой (рис. 1). 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 трубки до перегородки (I) и после нее (II). Пусть, для определенности, через трубку прошел 1 моль углекислого газа с молярной массой μ . 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 $A_1 = P_1 V_1$. Покидая рассматриваемый объем, 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:

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

Подставляя выражения для A_1 и A_2 и перегруппировывая члены, найдем:

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

Для процесса Джоуля-Томсона важно то, что он протекает медленно, то есть макроскопической скоростью течения газа можно пренебречь, следовательно $\Delta H = 0$. Представляя энтальпию как функцию переменных P и T , имеем:

$$0 = \Delta H = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \frac{\Delta T}{\Delta P} + \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T.$$

Далее воспользуемся соотношениями:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P = C_P, \quad \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T = T \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_T + V = -T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P + V,$$

откуда окончательно получим формулу коэффициента Джоуля-Томсона:

$$\mu_{\text{ДТ}} = \frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P - V}{C_P}.$$

Для идеального газа выполнено $(\partial V / \partial T)_P = V/T$, поэтому $\mu_{\text{ДТ}} = 0$, то есть эффект Джоуля-Томсона не наблюдается. Применим полученную формулу к газу Ван-дер-Ваальса, чье уравнение состояния:

$$P = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{v^2}, \quad \text{где } v - \text{молярный объем.}$$

Раскладывая первое слагаемое в ряд, в первом приближении получим:

$$\frac{Pv}{RT} = 1 + \frac{1}{v} \left(b - \frac{a}{RT} \right).$$

Используя приближение в виде $v = RT/P$, получим:

$$v = \frac{RT}{P} + b - \frac{a}{RT},$$

следовательно:

$$T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P - v = \left(\frac{RT}{P} + \frac{a}{RT} \right) - \left(\frac{RT}{P} + b - \frac{a}{RT} \right) = -b + \frac{2a}{RT},$$

$$\mu_{\text{ДТ}} = \frac{\frac{2a}{RT} - b}{C_P}. \quad (1)$$

При достаточно малых температурах эффект положительный – при дросселировании газ охлаждается, однако при достижении температуры инверсии:

$$T_{\text{инв}} = \frac{2a}{Rb}$$

эффект меняет знак на отрицательный. Используя понятие критической температуры, несложно установить, что

$$T_{\text{инв}} = \frac{27}{4} T_{\text{кр}}.$$

Качественно, эффект Джоуля-Томсона можно понять из следующих соображений. С одной стороны газ совершает работу против сил давления «на выходе», а также при увеличении расстояния между молекулами (расширении газа) увеличивается их потенциальная энергия, то

есть совершается работа против сил притяжения. Все это частично происходит за счет уменьшения кинетической энергии молекул (выраженное в охлаждении газа), и частично – за счет работы, совершенной над газом «на входе». Параметр a учитывает силу притяжения молекул, поэтому его большие значения способствуют охлаждению. Параметр b учитывает «силы отталкивания», поэтому его большие значения способствуют нагреванию. При малых значениях температуры (и большом объеме, хотя в нашем приближении этот эффект не попал в формулу) силы притяжения доминируют над силами отталкивания, и газ остывает. Наоборот, при больших температурах (и большом давлении) газ стремится к расширению и доминируют силы отталкивания, газ нагревается.

2 Экспериментальная установка

Схема установки для исследования эффекта Джоуля–Томсона в углекислом газе представлена на рис. 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 $d = 3$ 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 $10 \text{ см}^3/\text{с}$); 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 $T_{\text{в}}$, помещенным в термостате. Требуемая температура воды устанавливается и поддерживается во время эксперимента при помощи контактного термометра $T_{\text{к}}$.

Давление газа в трубке измеряется манометром М и регулируется вентилем В (при открывании вентиля В, то есть 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 ΔP .

Разность температур газа до перегородки и после нее измеряется дифференциальной термопарой медь-константан. Константановая проволока диаметром 0,1 мм соединяет спаи 8 и 9, а медные проволоки (того же диаметра) подсоединены к цифровому вольтметру 7. Отвод тепла через проволоку столь малого сечения пренебрежимо мал. 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.

3 Ход работы

Проведем серию измерений разности напряжения ΔU на термопаре от разности давлений ΔP при фиксированной температуре T . Используя табличные значения чувствительности термопары dU/dT , найдем разность температур входящего и выходящего газа ΔT . Результаты приведены в таблицах 1, а также отображены на рис. 2. Для удобства все значения указаны с противоположным знаком – например, $\Delta T > 0$, тогда газ остывает.

Температура $T = 21^\circ\text{C}$		
ΔP , бар	ΔU , мкВ	ΔT , $^\circ\text{C}$
$2,0 \pm 0,1$	40 ± 2	$0,99 \pm 0,05$
$2,5 \pm 0,1$	59 ± 2	$1,46 \pm 0,05$
$3,0 \pm 0,1$	78 ± 2	$1,93 \pm 0,05$
$3,5 \pm 0,1$	97 ± 2	$2,4 \pm 0,05$
$4,0 \pm 0,1$	116 ± 2	$2,88 \pm 0,05$

Температура $T = 50^\circ\text{C}$		
ΔP , бар	ΔU , мкВ	ΔT , $^\circ\text{C}$
$2,0 \pm 0,1$	25 ± 2	$0,58 \pm 0,05$
$2,5 \pm 0,1$	41 ± 2	$0,96 \pm 0,05$
$3,0 \pm 0,1$	55 ± 2	$1,29 \pm 0,05$
$3,5 \pm 0,1$	73 ± 2	$1,71 \pm 0,05$
$4,0 \pm 0,1$	88 ± 2	$2,06 \pm 0,05$

Температура $T = 30^\circ\text{C}$		
ΔP , бар	ΔU , мкВ	ΔT , $^\circ\text{C}$
$2,0 \pm 0,1$	31 ± 2	$0,75 \pm 0,05$
$2,5 \pm 0,1$	47 ± 2	$1,14 \pm 0,05$
$3,0 \pm 0,1$	66 ± 2	$1,61 \pm 0,05$
$3,5 \pm 0,1$	86 ± 2	$2,09 \pm 0,05$
$4,0 \pm 0,1$	104 ± 2	$2,53 \pm 0,05$

Температура $T = 60^\circ\text{C}$		
ΔP , бар	ΔU , мкВ	ΔT , $^\circ\text{C}$
$2,0 \pm 0,1$	25 ± 2	$0,57 \pm 0,05$
$2,5 \pm 0,1$	40 ± 2	$0,92 \pm 0,05$
$3,0 \pm 0,1$	54 ± 2	$1,24 \pm 0,05$
$3,5 \pm 0,1$	72 ± 2	$1,65 \pm 0,05$
$4,0 \pm 0,1$	86 ± 2	$1,97 \pm 0,05$

Таблица 1: Измерения процесса Джоуля-Томсона при фиксированных температурах

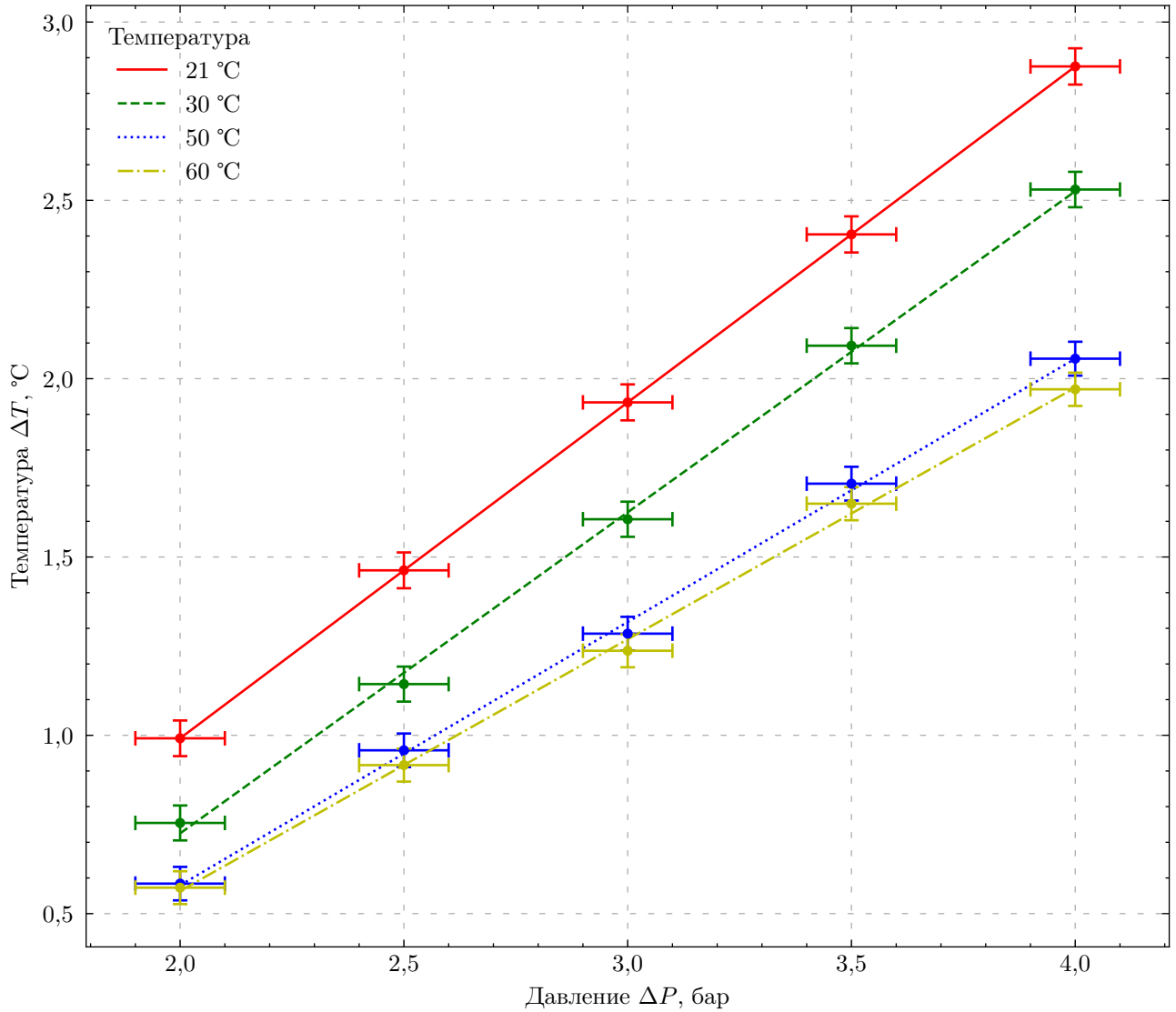


Рис. 2: Зависимость разности температур от разности давлений в процессе Джоуля-Томсона

На основании полученных зависимостей посчитаем значение коэффициента Джоуля-Томсона $\mu_{\text{ДТ}} = \frac{\Delta T}{\Delta P}$. Результаты представлены в таблице 2.

$T, ^\circ\text{C}$	21	30	50	60
$\mu_{\text{ДТ}}, \text{K/бар}$	$0,93 \pm 0,07$	$0,89 \pm 0,06$	$0,73 \pm 0,05$	$0,7 \pm 0,05$

Таблица 2: Значения коэффициента Джоуля-Томсона при разных температурах

Чтобы вычислить коэффициенты уравнения состояния Ван-дер-Ваальса, линейно приблизим зависимость $\mu_{\text{ДТ}}$ от $1/T$, см. рис 3. Воспользовавшись уравнением (1), и приняв $C_p = 37,1 \frac{\text{Дж}}{\text{K} \cdot \text{моль}}$, окончательно получим:

$$a = 9,7 \pm 2,9 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{моль}^2} \quad b = 44 \pm 22 \frac{\text{см}^3}{\text{моль}} \quad T_{\text{инв}} = 524 \pm 559 \text{ K}$$

В то время как табличные значения составляют

$$a^{\text{табл}} = 36,5 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{моль}^2} \quad b^{\text{табл}} = 42,8 \frac{\text{см}^3}{\text{моль}} \quad T_{\text{инв}}^{\text{табл}} = 1500 \text{ K}$$

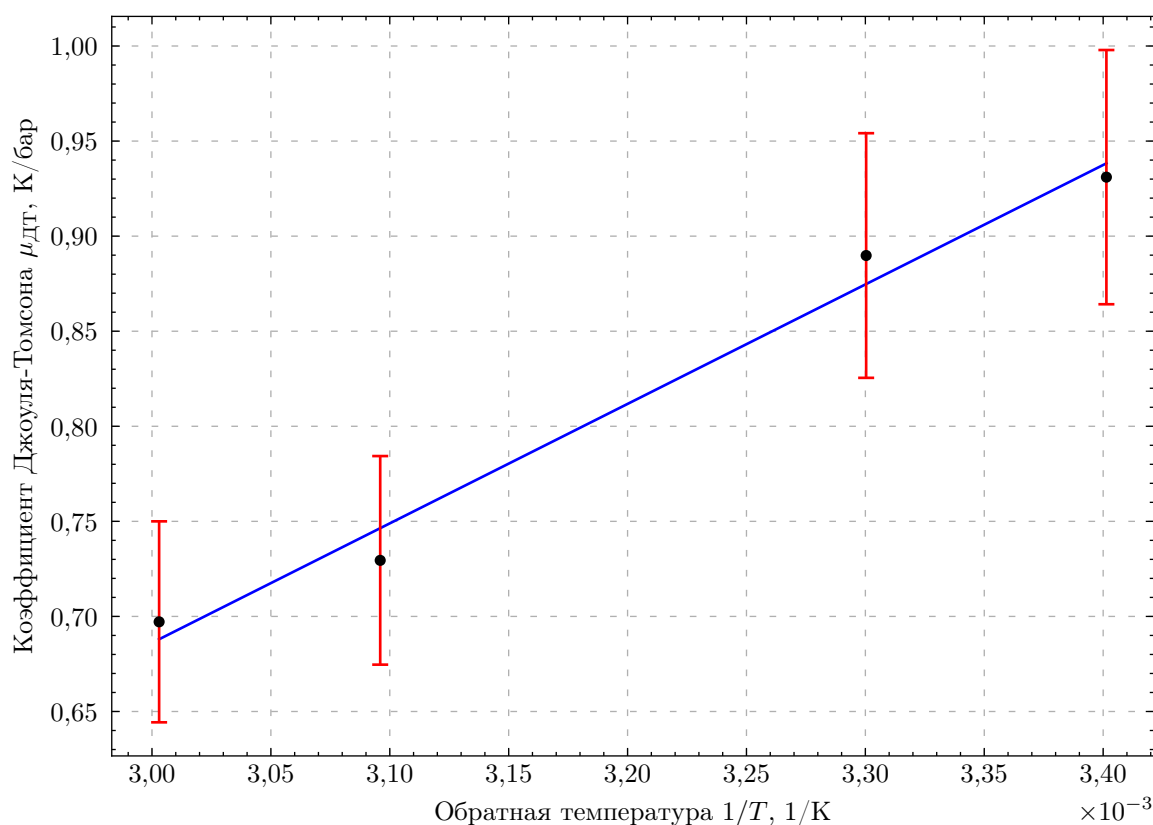


Рис. 3: Зависимость коэффициента Джоуля-Томсона от обратной температуры

4 Выводы

Как видно, результаты совершенно не сходятся с табличными значениями, более того, табличные значения даже не попадают в кресты погрешности. Помимо очевидного несовершенства эксперимента, причиной может быть локальный характер применимости уравнения состояния Ван-дер-Ваальса: коэффициенты хорошо описывают поведение газа лишь в некоторой окрестности фазового пространства, при этом их табличные значения могли быть получены в условиях, отличных от условий нашего эксперимента.