

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

**Отчёт по лабораторной работы 2.1.6**

**Эффект Джоуля - Томсона.**

Выполнил студент:

Сериков Василий Романович

группа: Б03-102

Москва, 2022 г.

## Аннотация

### Цель работы:

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 «а» и «b».

### 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.

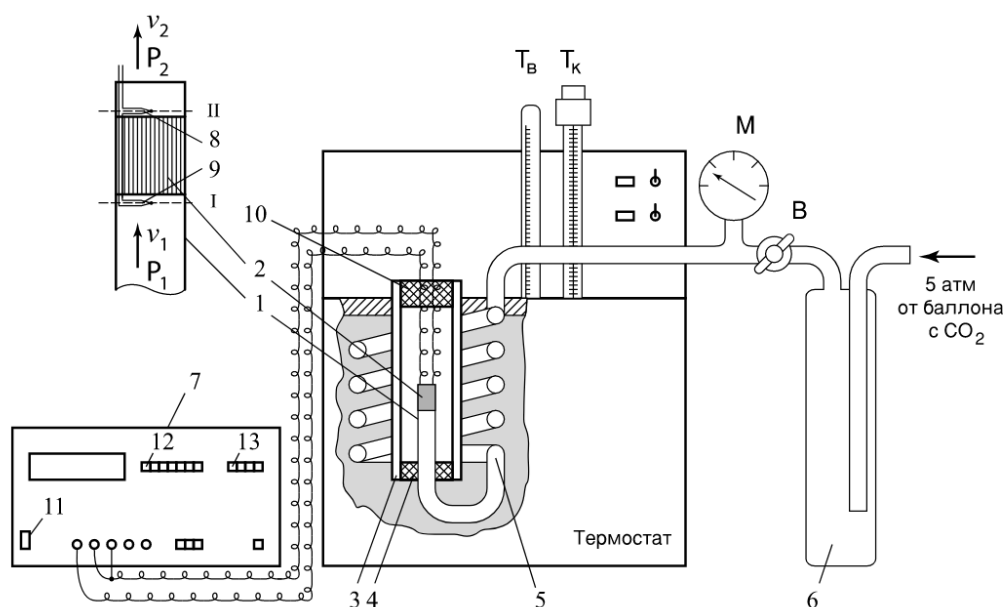


Рис. 1: Схема установки для изучения эффекта Джоуля–Томсона.

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 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:

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

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.

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

Отсюда 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

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} > 0, \quad (4)$$

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

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} < 0, \quad (5)$$

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

Этот результат нетрудно понять из энергетических соображений. Как мы уже знаем, у идеального газа эффект Джоуля–Томсона отсутствует. Идеальный газ отличается от реального тем, что в нем можно пренебречь потенциальной энергией взаимодействия молекул. Наличие этой энергии приводит к охлаждению или нагреванию реальных газов при расширении. При больших  $a$  велика энергия притяжения молекул. Это означает, что потенциальная энергия молекул при их сближении уменьшается, а при удалении — при расширении газа — возрастает. Возрастание потенциальной энергии молекул происходит

за счет их кинетической энергии — температура газа при расширении падает. Аналогичные рассуждения позволяют понять, почему расширяющийся газ нагревается при больших значениях  $b$ .

$$T_i = 2a/Rb$$

Как следует из формулы выше при температуре  $T_i$  коэффициент  $\mu_{\text{д-т}}$  обращается в нуль. Используя связь между коэффициентами  $a$  и  $b$  и критической температурой, найдем

$$T_{\text{инв}} = \frac{27}{4}T_{\text{кр}}. \quad (6)$$

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

При больших изменениях давления, например, при дросселировании от 200 до 1 атм (интегральный эффект Джоуля–Томсона), как это нередко бывает в промышленных установках, разложением пользоваться нельзя и приходится прибегать к общему соотношению. При этом связь между температурой и давлением находится с помощью специальных диаграмм, например, кривых  $H = \text{const}$ , проведенных в координатах температура–давление или температура–энтропия. Такие диаграммы строятся по экспериментальным данным и широко используются в технике.

Вернемся к влиянию правой части уравнения (2) на изменение температуры расширяющегося газа. Для этого сравним изменение температуры, происходящее вследствие эффекта Джоуля–Томсона, с изменением температуры, возникающим из-за изменения кинетической энергии газа. Увеличение кинетической энергии газа вызывает заметное и приблизительно одинаковое понижение его температуры как у реальных, так и у идеальных газов. Поэтому при оценках нет смысла пользоваться сложными формулами для газа Ван-дер-Ваальса.

Заменяя в формуле (2)  $U$  через  $C_V T$  и  $PV$  через  $RT$ , найдем

$$(R + C_V)(T_1 - T_2) = \mu(v_2^2 - v_1^2)/2, \quad (7)$$

или

$$\Delta T = \frac{\mu}{2C_p}(v_2^2 - v_1^2). \quad (8)$$

В условиях нашего опыта расход газа  $Q$  на выходе из пористой перегородки не превышает  $10^{-3}$  л/с, а диаметр трубки равен 3 мм. Поэтому

$$v_2 \leq \frac{4Q}{\pi d^2} \approx 140 \text{ м/с}. \quad (9)$$

Скорость  $v_1$  газа у входа в пробку относится к скорости  $v_2$  у выхода из нее как давление  $P_2$  относится к  $P_1$ . В нашей установке  $P_1 = 4$  атм, а  $P_2 = 1$  атм, поэтому

$$v_1 = \frac{P_2}{P_1}v_2 = 35 \text{ м/с}. \quad (10)$$

Для углекислого газа  $\mu = 44$  г/моль,  $C_p = 40$  Дж/(моль·К); имеем

$$\Delta T = \frac{\mu}{2C_p}(v_2^2 - v_1^2) = 7 \cdot 10^{-4} \text{ К}. \quad (11)$$

Это изменение температуры ничтожно мало по сравнению с измеряемым эффектом (несколько градусов).

В данной лабораторной работе исследуется коэффициент дифференциального эффекта Джоуля–Томсона для углекислого газа. По экспериментальным результатам оценивается коэффициент теплового расширения, постоянные в уравнении Ван-дер-Ваальса и температура инверсии углекислого газа. Начальная температура газа  $T_1$  задается термостатом. Измерения проводятся при трех температурах: комнатной, 50 и 80.

### **Экспериментальная установка.**

Схема установки для исследования эффекта Джоуля–Томсона в углекислом газе см. 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  $10^{-3}$  л/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 М и регулируется вентилем В (при открытии 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  $\Delta P = P_1 - P_2$ .

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 посеребренны, 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.

### **Используемое оборудование:**

Трубка с пористой перегородкой; труба Дьюара; термостат; термометры; дифференциальная термопара; микровольтметр; балластный баллон; манометр.

### **Результаты измерений и обработка данных:**

1. Начальные данные и погрешности:  $\sigma_P = 0.1$  атм.,  $\sigma_U = 1$  мкВ
2. Проведем измерение показаний вольтметра в зависимости от давления для различных температур. Полученные данные занесем в таблицу ( $\sigma_{\Delta T} = \Delta T \sigma_P / \Delta P \approx 0,03^\circ C$ )

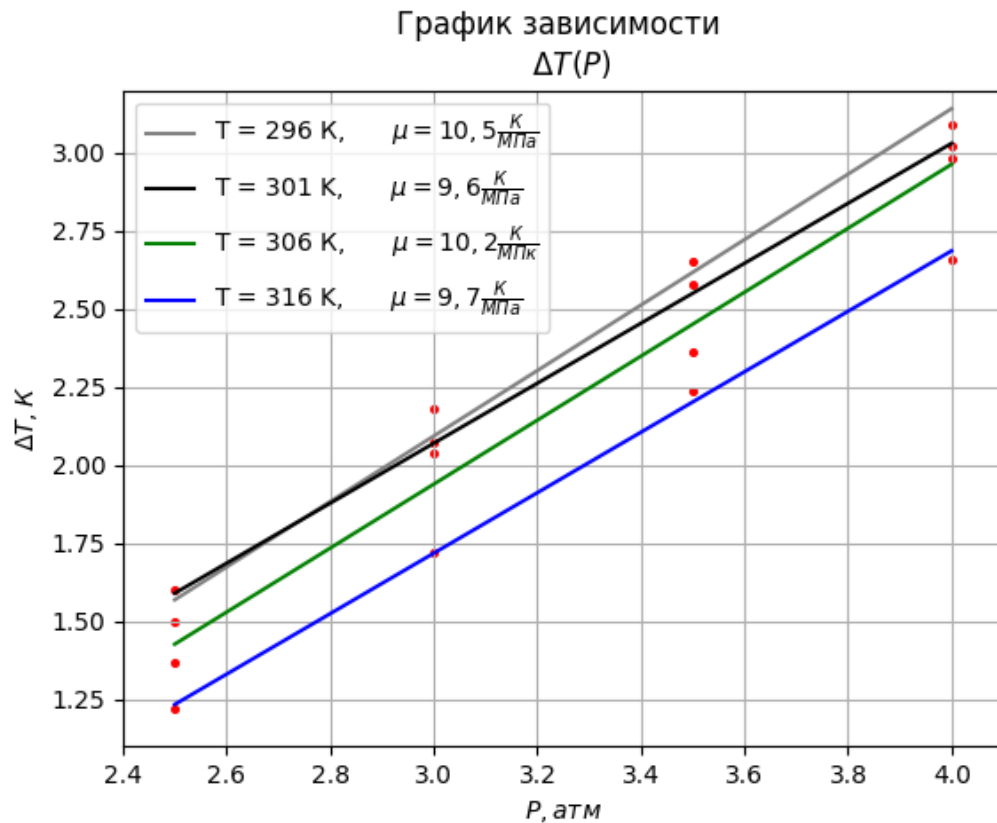
$\Delta P$ , атм	$U$ , мкВ	$\Delta T, ^\circ C$		$\Delta P$ , атм	$U$ , мкВ	$\Delta T, ^\circ C$
4	126	3,09		4	123	3,02
3,5	108	2,65		3,5	105	2,58
3	89	2,18		3	83	2,04
2,5	61	1,50		2,5	70	1,72

Таблица 1: Данные для  $T = 296$  К,  $T = 301$  К

$\Delta P$ , атм	$U$ , мкВ	$\Delta T, ^\circ C$		$\Delta P$ , атм	$U$ , мкВ	$\Delta T, ^\circ C$
4	124	2,98		4	113	2,66
3,5	98	2,36		3,5	95	2,24
3	86	2,07		3	73	1,72
2,5	57	1,37		2,5	52	1,22

Таблица 2: Данные для  $T = 306$  К,  $T = 316$  К

3. Построим график зависимости  $\Delta T(\Delta P)$  По наклону графика определим коэффициент Джоуля-Томсона для каждой температуры. По МНК определим погрешности полученных коэффициентов. ( $\sigma_\mu = 0,3 \text{ К/МПа}$ )



4. Определим постоянные  $a$ ,  $b$  и  $T_{\text{инв}}$  для углекислого газа для наших температур по формулам:

$$\mu_{\text{Д.Т}} = \frac{\frac{2a}{RT} - b}{C_p}$$

$$a = \frac{2R^2(\mu_2 - \mu_1)}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)}$$

$$b = \frac{2a}{RT_1} - 4R\mu_1$$

$$T_{\text{инв}} = 2a/Rb$$

T, K	306 - 296	316 - 306
a, Н м <sup>4</sup> /моль <sup>2</sup>	0,38 ±0,04	0,668 ±0,04
b, см <sup>3</sup> /моль	44 ±5	44 ± 5
$T_{\text{инв}}$ , K	2046 ±232	3645 ±414

### **Обсуждение результатов:**

В ходе данной работы мы определили коэффициенты уравнения газа Ван-дер-Ваальса, одна пара из которых совпадает с теоретическими результатами в пределах погрешности, а вторая нет. Аналогично с температурой инверсии в первом и втором случае.

### **Выводы:**

По полученным результатам нельзя однозначно установить применимость уравнения газа Ван-дер-Ваальса. Необходимо более точно проводить эксперимент, используя более точные методы и приборы. Основная проблема проведения эксперимента - определение момента, когда можно считать, что система пришла в равновесие, отсюда и следует большой разброс полученных значений.