



Физтех-школа аэрокосмических технологий

15 марта 2024 года

Лабораторная работа 2.1.6

ЭФФЕКТ ДЖОУЛЯ-ТОМСОНА

Зайцев Александр

Б03-305

Цель работы: определение изменения температуры углекислого газа при протекании через слабопроницаемую перегородку при разных начальных значениях давления и температуры; вычисление коэффициентов Ван-дер-Ваальса.

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

Модель Ван-дер-Ваальса.

Уравнение состояния реального газа:

$$(P + \frac{a}{V^2})(V - b) = RT \quad (1)$$

Коэффициент Джоуля-Томсона:

$$\mu = \frac{1}{C_p} (\frac{2a}{RT} - b) \quad (2)$$

Модель Бертло.

Уравнение состояния реального газа:

$$(P + \frac{a}{TV^2})(V - b) = RT \quad (3)$$

Коэффициент Джоуля-Томсона:

$$\mu = \frac{1}{C_p} (\frac{3a}{RT^2} - b) \quad (4)$$

Экспериментальная установка.

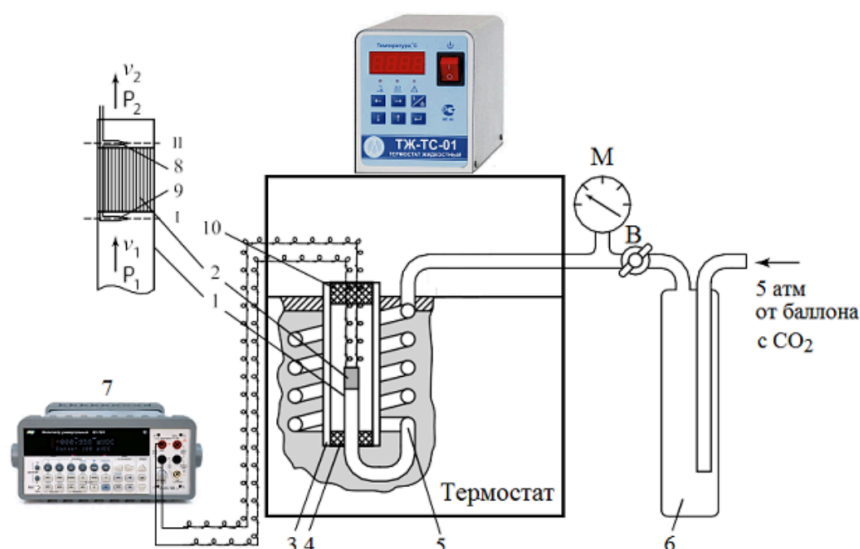


Рис.1 Экспериментальная установка

Схема установки для исследования эффекта Джоуля–Томсона в углекислом газе представлена на рисунке 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 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 $T_{\text{в}}$, 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, т. е. 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 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.

Измерения в соответствии с инструкцией записаны в таблицу.

Погрешности измерительных приборов:

$$\sigma_P = 0,1 \text{ бар}$$

$$\sigma_T = 0,01K$$

$$\sigma_E = 1 \text{ мкВ}$$

Класс точности манометра 1. Температура в комнате на момент начала регистрации данных 21,7°C.

Таблица 1. Результаты измерений

№	$T_{\text{тер}}, ^\circ\text{C}$	E, мкВ	$\frac{dV}{dT}$, мкВ/°C	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	ΔP , бар
1	20,00	125	40,7	3,07	4,05
2		104		2,56	3,60
3		81		1,99	3,00
4		61		1,5	2,50
5		42		1,03	2,00
6		26		0,64	1,55
7	35,00	124	41,5	2,99	4,00
8		97		2,34	3,60
9		70		1,69	3,00
10		51		1,23	2,50
11		44		1,06	2,20
12		29		0,7	1,70
13	45,00	101	42,4	2,38	4,00
14		85		2	3,50
15		64		1,51	3,00
16		49		1,16	2,50
17		34		0,8	2,00
18		25		0,59	1,65
19	55,00	97	43,2	2,25	4,00
20		78		1,81	3,50
21		54		1,25	2,80
22		40		0,93	2,30
23		24		0,56	1,80
24		16		0,37	1,50

Графики зависимости разности температур ΔT от перепада давлений ΔP на одних координатных осях для всех четырех значений температуры термостата приведены на рисунке 2.

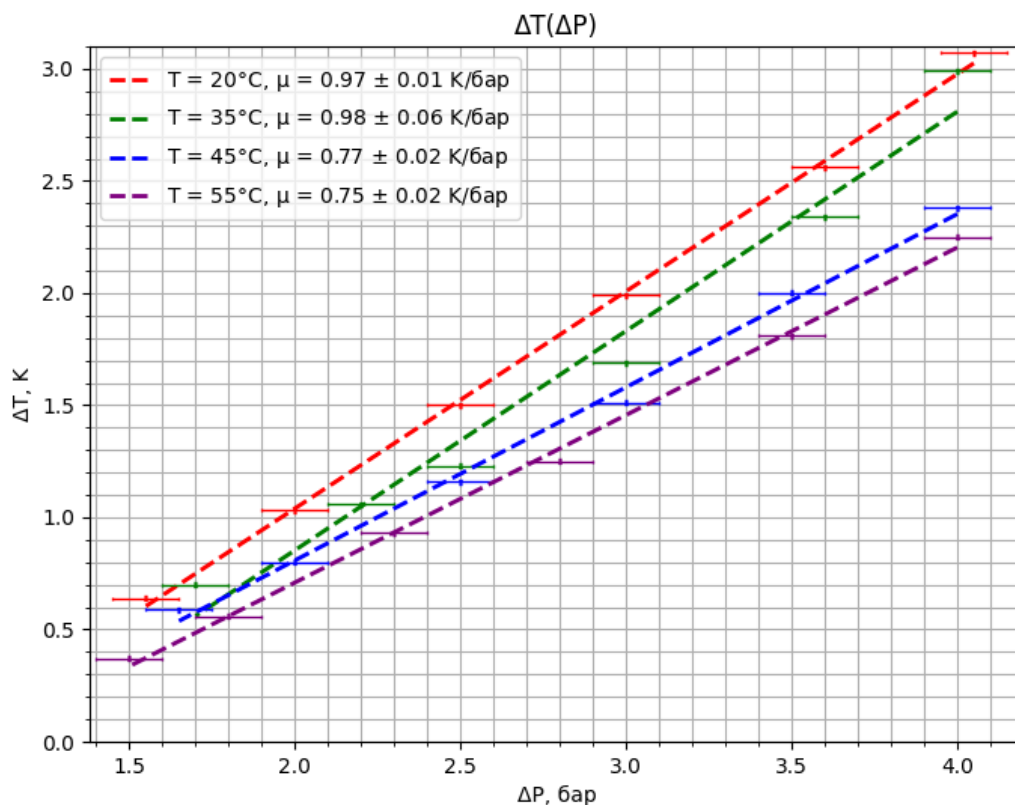


Рис. 2 Графики зависимостей

Угловые коэффициенты прямой это коэффициенты Джоуля-Томсона:

$$T = 20^\circ\text{C} \rightarrow \mu = 0,97 \pm 0,01 \text{ К/бар}$$

$$T = 35^\circ\text{C} \rightarrow \mu = 0,98 \pm 0,06 \text{ К/бар}$$

$$T = 45^\circ\text{C} \rightarrow \mu = 0,77 \pm 0,02 \text{ К/бар}$$

$$T = 55^\circ\text{C} \rightarrow \mu = 0,75 \pm 0,02 \text{ К/бар}$$

Погрешность коэффициентов Джоуля-Томсона находится по формуле

$$\sigma_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} - k^2} \quad (5)$$

Табличные значения коэффициентов Джоуля-Томсона для некоторых температур:

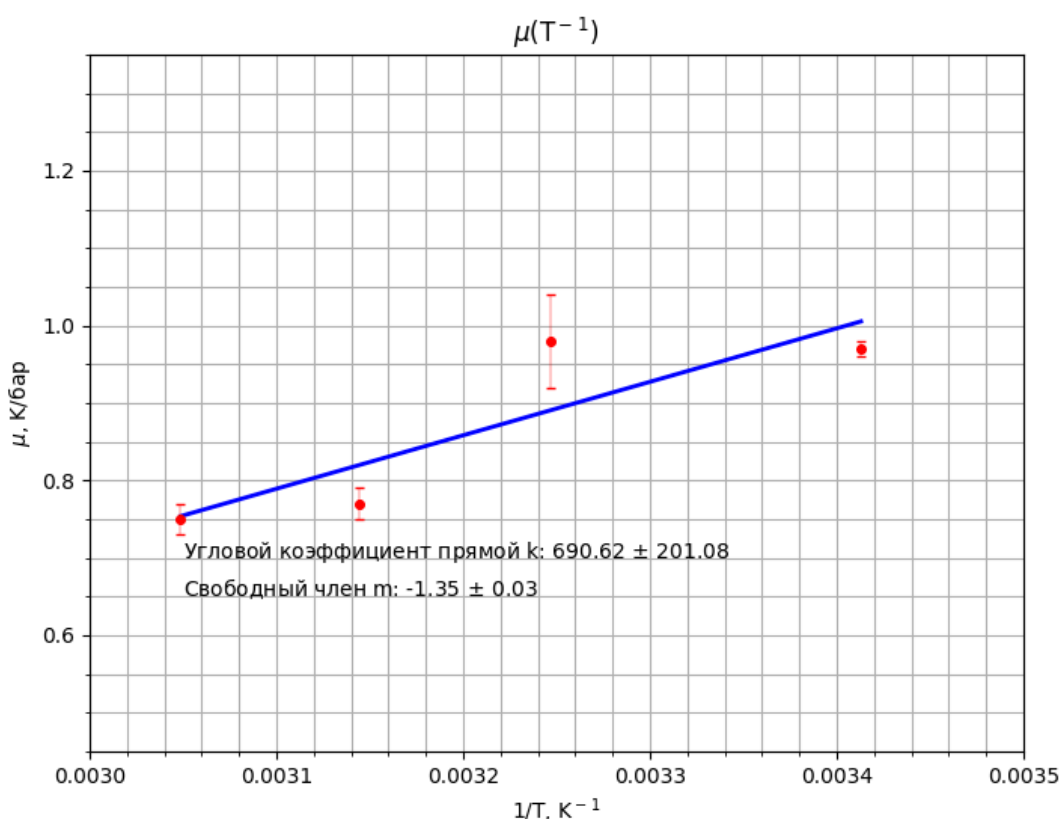
$$T = 20^\circ\text{C} \rightarrow \mu_{\text{tab}} = 1,09 \text{ К/бар}$$

$$T = 40^\circ\text{C} \rightarrow \mu_{\text{tab}} = 0,95 \text{ К/бар}$$

$$T = 50^\circ\text{C} \rightarrow \mu_{\text{tab}} = 0,83 \text{ К/бар}$$

Модель Ван-дер-Ваальса.

График зависимости коэффициентов Джоуля-Томсона от обратной температуры термостата для определения коэффициентов в модели реального газа Ван-дер-Ваальса (1):



Погрешность углового коэффициента была найдена по формуле (5).

Погрешность свободного члена найдена по формуле

$$\sigma_m = \sigma_k \cdot \sqrt{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} \quad (6)$$

Несовпадение прямой с крестами погрешностей и высокая погрешность углового коэффициента свидетельствует о том, что модель Ван-дер-Ваальса слабо применима в условиях данного эксперимента. Его применение возможно лишь только для качественного описания изменений состояния реального газа. Тем не менее, пользуясь формулой (2) можно определить коэффициенты a и b в уравнении состояния реального газа, приняв $C_p = 36,5 \frac{\text{Дж} \cdot \text{моль}}{\text{кг}}$.

$$a = \frac{1}{2} R C_p k \cdot 10^{-5} \approx 1,05 \frac{\text{Дж} \cdot \text{м}^3}{\text{моль}^2}$$

$$b = - C_p m \cdot 10^{-5} \approx 0,05 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$$

$$\sigma_a = a \frac{\sigma_k}{k} = 0,30 \frac{\text{Дж} \cdot \text{м}^3}{\text{моль}^2}$$

$$\sigma_b = b \frac{\sigma_m}{m} = 0,01 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$$

Табличные значения этих коэффициентов для углекислого газа:

$$a_{tab} = 0,365 \frac{\text{Дж} \cdot \text{м}^3}{\text{моль}^2}$$

$$b_{tab} = 42,9 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$$

Температура инверсии по модели Ван-дер-Ваальса рассчитывается по формуле:

$$T_{инв} = \frac{2a}{Rb} \quad (7)$$

Найденные коэффициенты можно подставить в формулу (7). Получается

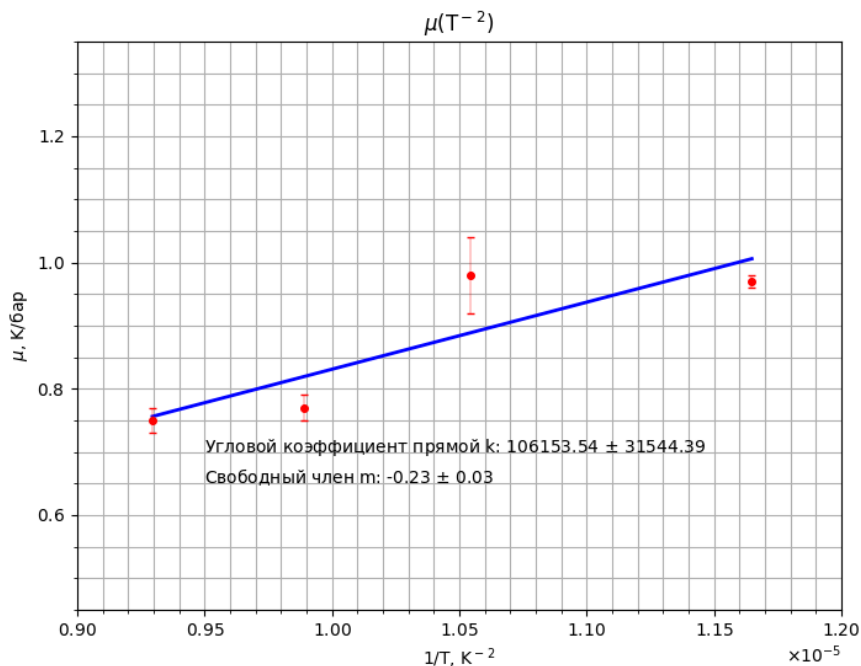
$$T_{инв} = 5,11 \cdot 10^6 \text{ К}$$

Табличное значение температуры инверсии:

$$T_{инв} = 2047,69 \text{ К}$$

Модель Бертло.

График зависимости коэффициентов Джоуля-Томсона от обратного квадрата температуры термостата для определения коэффициентов в модели реального газа Бертло (3):



Погрешности углового коэффициента и свободного члена определены по формулам (5) и (6) соответственно.

Несовпадение прямой с крестами погрешностей и высокая погрешность углового коэффициента свидетельствует о том, что модель Ван-дер-Ваальса слабо применима в условиях данного эксперимента. Его применение возможно лишь только для качественного описания изменений состояния реального газа. Тем не менее, пользуясь формулой (4) можно определить коэффициенты а и b в уравнении

состояния реального газа, приняв $C_p = 36,5 \frac{\text{Дж} \cdot \text{моль}}{\text{кг}}$.

$$a = \frac{1}{3} R C_p k \cdot 10^{-5} \approx 107 \frac{\text{Дж} \cdot \text{К} \cdot \text{м}^3}{\text{моль}^2}$$

$$b = - C_p m \cdot 10^{-5} \approx 0,83 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$$

$$\sigma_a = a \frac{\sigma_k}{k} = 31,79 \frac{\text{Дж} \cdot \text{К} \cdot \text{м}^3}{\text{моль}^2}$$

$$\sigma_b = b \frac{\sigma_m}{m} = 0,10 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$$

Табличные значения этих коэффициентов для углекислого газа:

$$a_{tab} = 110 \frac{\text{Дж} \cdot \text{м}^3}{\text{моль}^2}$$

$$b_{tab} = 42,7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$$

Вывод.

В модели газа Ван-дер-Ваальса сильно экспериментально полученные коэффициенты (в т.ч. температура инверсии) сильно не сошлись с табличными. Аналогичная ситуация в модели газа Бертло, где сошелся только коэффициент а, но при этом его погрешность составила целых 29%. Модель реального газа Ван-дер-Ваальса и модель реального газа Бертло имеют свои ограничения и ограниченную область применения. Экспериментально полученные коэффициенты а и b могут не совпадать с табличными из-за несовершенства самой модели или из-за неточностей в измерениях. Это может привести к искажению результатов и невозможности точного применения моделей на практике.

Таким образом, несмотря на то, что модели реального газа Ван-дер-Ваальса и Бертло имеют свою ценность в теоретических исследованиях, их применение в реальной жизни может быть ограничено из-за несовершенства и неточности.