

Отчет о выполнении лабораторной работы 2.2.1

Исследование взаимной диффузии газов

Костылев Влад, Б01-208

22 февраля 2023 г.

Аннотация

Цель работы: 1) регистрация зависимости концентрации гелия в воздухе от времени с помощью датчиков теплопроводности при разных начальных давлениях смеси газов; 2) определение коэффициента диффузии по результатам измерений.

В работе используются: измерительная установка; форвакуумный насос; баллон с газом (гелий); манометр; источник питания; магазин сопротивлений; гальванометр; секундомер.

1 Теоретическая справка

Диффузией называется самопроизвольное перемешивание молекул, происходящее вследствие их хаотичного теплового движения. При перемешивании молекул разного сорта говорят о взаимной (или концентрационной) диффузии. Для наблюдения взаимной диффузии необходимо равенство давлений во всей системе (в противном случае возникнет гораздо более быстрое макроскопическое течение газа как сплошной среды).

Воспользовавшись законом Фика, напишем плотность потока в системе в результате взаимной диффузии (система состоит из компонентов а и b):

$$i_a = -D_{ab} \frac{dn_a}{dx} \quad i_b = -D_{ba} \frac{dn_b}{dx}, \quad (1)$$

где $D = D_{ab} = D_{ba}$ - коэффициент взаимной диффузии, а i_a, i_b - плотность потока соответствующего сорта.

Предположим, что концентрации в сосудах 1 и 2 нашей установки поддерживались бы постоянными, тогда в трубке длиной l и площадью поперечного сечения S бы установился стационарный поток:

$$J = -DS \frac{n_1 - n_2}{l}$$

Теперь предположим, что концентрации выравниваются медленно, тогда количество перетекших молекул в объеме V_1 равно $\Delta n_1 V_1$. Так как количество частиц постоянно, запишем следующее $\Delta n_1 V_1 + \Delta n_2 V_2 = const \Rightarrow \Delta n_1 V_1 = -\Delta n_2 V_2 = J \Delta t$. Далее поделим на dt и $V_1 V_2$ и вычтем, получим следующее:

$$\frac{dn_1}{dt} - \frac{dn_2}{dt} = -\frac{n_1 - n_2}{l} DS \left(\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2} \right)$$

Обозначим $n_1 - n_2 = \Delta n$ и несложным интегрированием получаем:

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-t/\tau}, \quad (2)$$

где $\tau = \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \frac{l}{SD}$ – постоянная времени процесса.

В данной установке, на схеме ниже D_1, D_2 – датчики теплопроводности, для измерения концентраций. В системе протянута тонкая проволока, которая может нагреваться и количество теплоты передаваемое стенке за единицу времени:

$$Q = x \frac{2\pi l}{\ln(R_u/r_{np})} (T_1 - T_2) \quad (3)$$

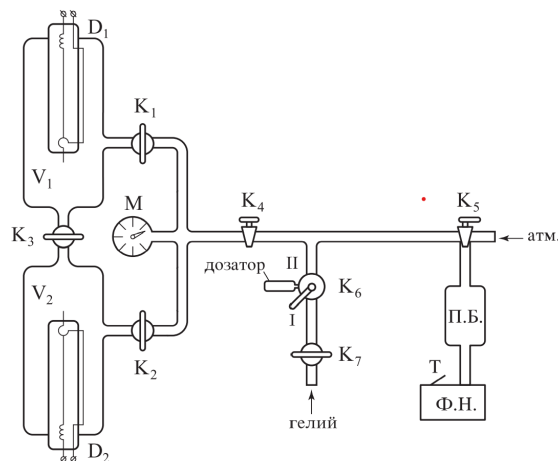
При заданном режиме нагревания ($Q = \text{const}$) температура проволоки и ее сопротивление определяется теплопроводностью газа. При достаточно малых изменениях концентраций можно ожидать, что величина тока, проходящая через гальванометр будет пропорциональна разности концентраций. Т.е. показания гальванометра будут описываться по закону (2), например в делениях шкалы гальванометра.

2 Используемое оборудование

В работе используются: измерительная установка; форвакуумный насос; баллон с газом (гелий); манометр; источник питания; магазин сопротивлений; гальванометр; секундомер.

3 Методика измерений

Ознакомившись с установкой, изображенной на рисунке ниже, проведем ряд измерений и занесем их в таблицу для дальнейшей обработки:

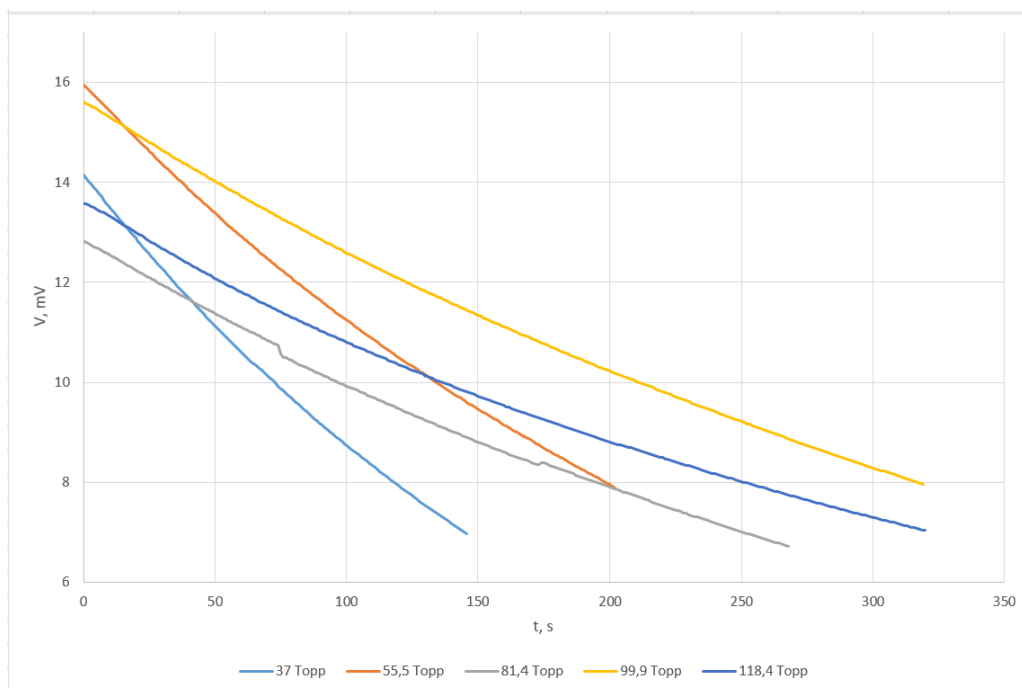


4 Результаты измерений и обработка данных

Первым делом перенесем полученные данные в общую таблицу:

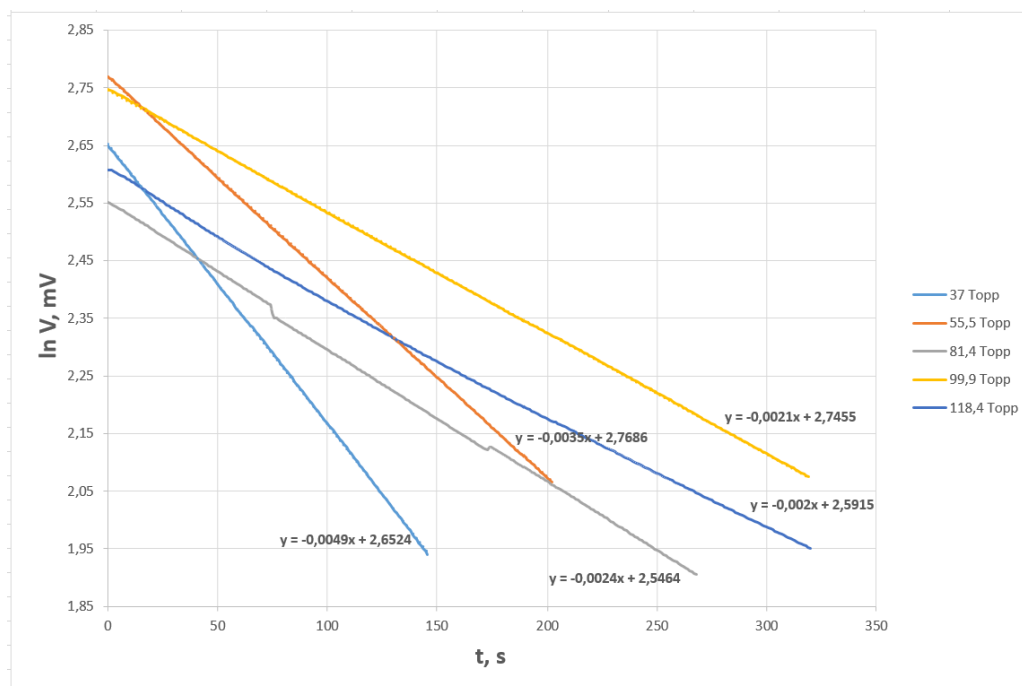
37 Торр		55,5 Торр		81,4 Торр		99,9 Торр		118,4 Торр	
t(s)	V(mV)	t(s)	V(mV)	t(s)	V(mV)	t(s)	V(mV)	t(s)	V(mV)
0	14,1433	0	15,9522	0	12,8186	0	15,6007	0	13,5698
0,969	14,0867	0,968	15,9074	1,004	12,795	1,05	15,574	0,969	13,5679
1,901	14,0274	1,969	15,8583	2,004	12,7716	2,1	15,5482	1,901	13,5539
2,863	13,9669	2,968	15,8064	3,004	12,744	3,136	15,5191	2,893	13,5267
3,826	13,9031	3,968	15,7539	4,003	12,7153	4,137	15,4891	3,892	13,4978
4,809	13,8387	4,968	15,7015	5,003	12,6887	5,136	15,4579	4,893	13,4674
...									

Далее, используя полученные результаты построим график зависимости V от t :



(Для значения 81,4 торра произошло небольшое отклонение от экспоненциальной зависимости. Почему? Оставим этот вопрос риторическим)

Далее, убедимся что здесь именно экспоненциальная зависимость, для этого построим график зависимости $\ln(V)$ от t :



Собственно, мы можем видеть линейную зависимость с соответствующим коэффициентами, которые изображены над каждой из прямых.

Далее, прологарифмировав формулу (2), найдем формулу для коэффициента диффузии:

$$D = -\frac{kVl}{2S}$$

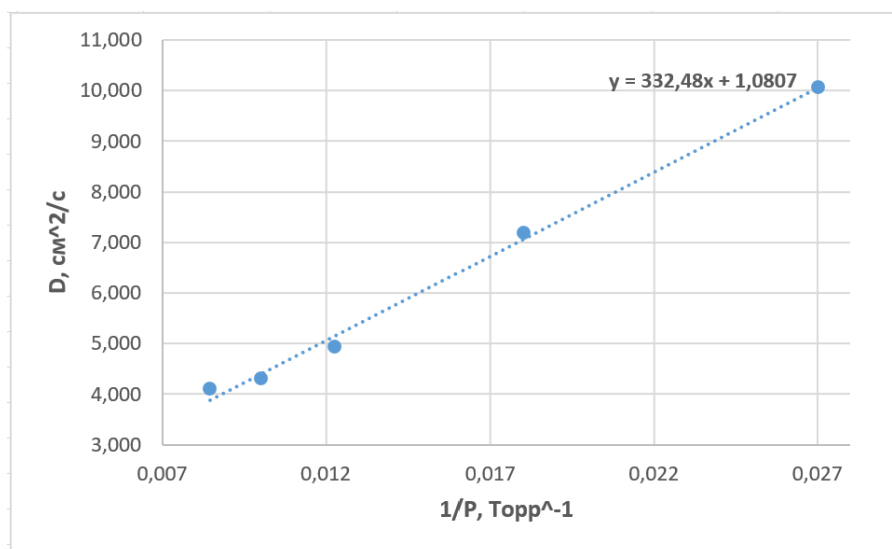
Для нашей установки известно следующее:

$$V = V_1 = V_2 = 775 \pm 10 \text{ см}^3 \quad \frac{l}{S} = 5,3 \pm 0,1 \text{ см}^{-1}$$

У нас есть все, чтобы рассчитать коэффициент диффузии для каждого рабочего давления, а также соответствующую погрешность:

P, Topp	D, см ² /с	dD, см ² /с
37	10,063	0,230
55,5	7,188	0,164
81,4	4,929	0,113
99,9	4,313	0,099
118,4	4,108	0,094

Давайте построим график зависимости D от 1/P:



Мы получаем прямую с соответствующими коэффициентами (указаны на графике). Теперь найдем коэффициент взаимной диффузии при атмосферном давлении:

$$D(p_0) = k/P_0 = 0,44 \pm 0,05 \text{ см}^2/\text{с} \quad D_{\text{табл}} = 0,62 \text{ см}^2/\text{с}$$

Оценим длину свободного пробега атомов гелия в воздухе:

$$\lambda = 3D\sqrt{\frac{\pi\mu}{8RT}} \approx 104,8 \pm 6,1 \text{ нм} \quad \lambda_{\text{табл}} = 175 \text{ нм}$$

5 Заключение

Проведя ряд измерений, мы научились вычислять коэффициент взаимной диффузии, убедились в экспоненциальной зависимости изменения концентрации от времени. Также увидели, что коэффициент диффузии линейно зависит от 1/P.