

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий

**Отчёт по лабораторной работе № 2.2.1
"ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМНОЙ ДИФФУЗИИ
ГАЗОВ"**

Выполнил:
Студент гр. Б01-305
Миннахметов Артур

Долгопрудный, 2024

1 Введение

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; балон с газом (гелий); манометр; источник питания; магазин сопротивлений; гальванометр; секундомер.

1.1 Теоретическая справка

Диффузией называют самопроизвольное взаимное проникновение веществ друг в друга происходящее вследствие хаотичного теплового движения молекул. При перемешивании молекул разного сорта говорят о взаимной (или концентрационной) диффузии. В системе, состоящей из двух компонентов а и b (бинарная смесь), плотности потоков частиц в результате взаимной диффузии определяются законом Фика:

$$j_a = -D \frac{\partial n_a}{\partial x}, j_b = -D \frac{\partial n_b}{\partial x}, \quad (1)$$

где D — коэффициент взаимной диффузии компонентов. Знак «минус» отражает тот факт, что диффузия идёт в направлении выравнивания концентраций. Равновесие достигается при равномерном распределении вещества по объёму.

В данной работе исследуется взаимная диффузия гелия и воздуха. Отметим, что давление и температура в системе предполагаются неизменным: $P_0 = (n_{He} + n_{Air})kT = const$, где n_{He} и n_{Air} — концентрации диффундирующих газов. Поэтому для любых изменений концентраций справедливо $\Delta n_{Air} = -\Delta n_{He}$. Следовательно, достаточно ограничиться описанием диффузии одного из компонентов, например гелия.

Приведём теоретическую оценку для коэффициента диффузии. В работе концентрация гелия, как правило, мала ($n_{He} \ll n_{Air}$). Кроме того, атомы гелия легче молекул, составляющих воздух ($m_{He} \ll m_{N_2}, m_{O_2}$), значит их средняя тепловая скорость велика по сравнению с остальными частицами. Поэтому перемешивание газов в работе можно приближенно описывать как диффузию примеси лёгких частиц He на практически стационарном фоне

воздуха. Коэффициент диффузии в таком приближении равен

$$D = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle, \quad (2)$$

где $\lambda = \frac{1}{n\sigma}$ – длина свободного пробега диффундирующих частиц; $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$ – их средняя тепловая скорость.

Предполагая, что процесс диффузии будет квазиостационарным, можно показать, что разность концентраций будет убывать по экспоненциальному закону

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-t/\tau}, \quad (3)$$

где τ – характерное время выравнивания концентраций между сосудами, определяемое следующей формулой

$$\tau = \frac{1}{D} \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \frac{L}{S}. \quad (4)$$

1.2 Методика измерений

Для исследования взаимной диффузии газов и измерения коэффициента взаимной диффузии D используется два сосуда объёмами V_1 и V_2 ($V_1 \approx V_2$), соединенные трубкой длины L и сечения S . Предполагается, что сосуды заполнены смесью двух газов при одинаковом давлении, но с различной концентрацией компонентов. Вследствие взаимной диффузии, проходящей в соединительной трубке, концентрации компонентов в сосудах с течением времени выравниваются.

Для измерения разности концентраций в установке применяются датчики теплопроводности. При этом используется тот факт, что теплопроводность смеси κ зависит от её состава. В общем случае зависимость $\kappa(n)$ довольно сложна, однако при малой разности Δn концентраций в сосудах можно ожидать, что разность теплопроводностей будет изменяться прямо пропорционально Δn :

$$\Delta \kappa = \kappa(n_2) - \kappa(n_1) \approx \text{const} \cdot \Delta n.$$

Эксперименты показывают, что если доля примеси гелия составляет менее 15%, отклонение от линейной зависимости не превышает 0,5%, что для наших целей вполне достаточно.

При заданной мощности нагревания приращение температуры проволоки и, следовательно, приращение её сопротивления пропорциональны

теплопроводности газа. Для измерения сопротивлений используется мостовая схема, позволяющая определять разность показаний датчиков с высокой точностью. Мост балансируется при заполнении сосудов (и датчиков) одной и той же смесью. При заполнении сосудов смесями различного состава возникает «разбаланс» моста. При незначительном различии в составах смесей показания гальванометра, подсоединённого к диагонали моста, будут пропорциональны разности концентраций примеси: $U \propto \Delta\kappa \propto \Delta n$. В процессе диффузии разность концентраций убывает по закону (3), и значит по тому же закону изменяются во времени показания гальванометра

$$U = U_0 e^{-t/\tau}, \quad (5)$$

где U_0 – показание в начальный момент времени. Измеряя экспериментально зависимость $U(t)$, можно получить характерное время процесса τ , откуда по формуле (4) определить коэффициент диффузии D .

2 Ход работы

2.1 Измерения

1. Давление окружающего воздуха 755,5 мм рт. ст., $V_1 = V_2 = V = (420 \pm 10) \text{ см}^3$

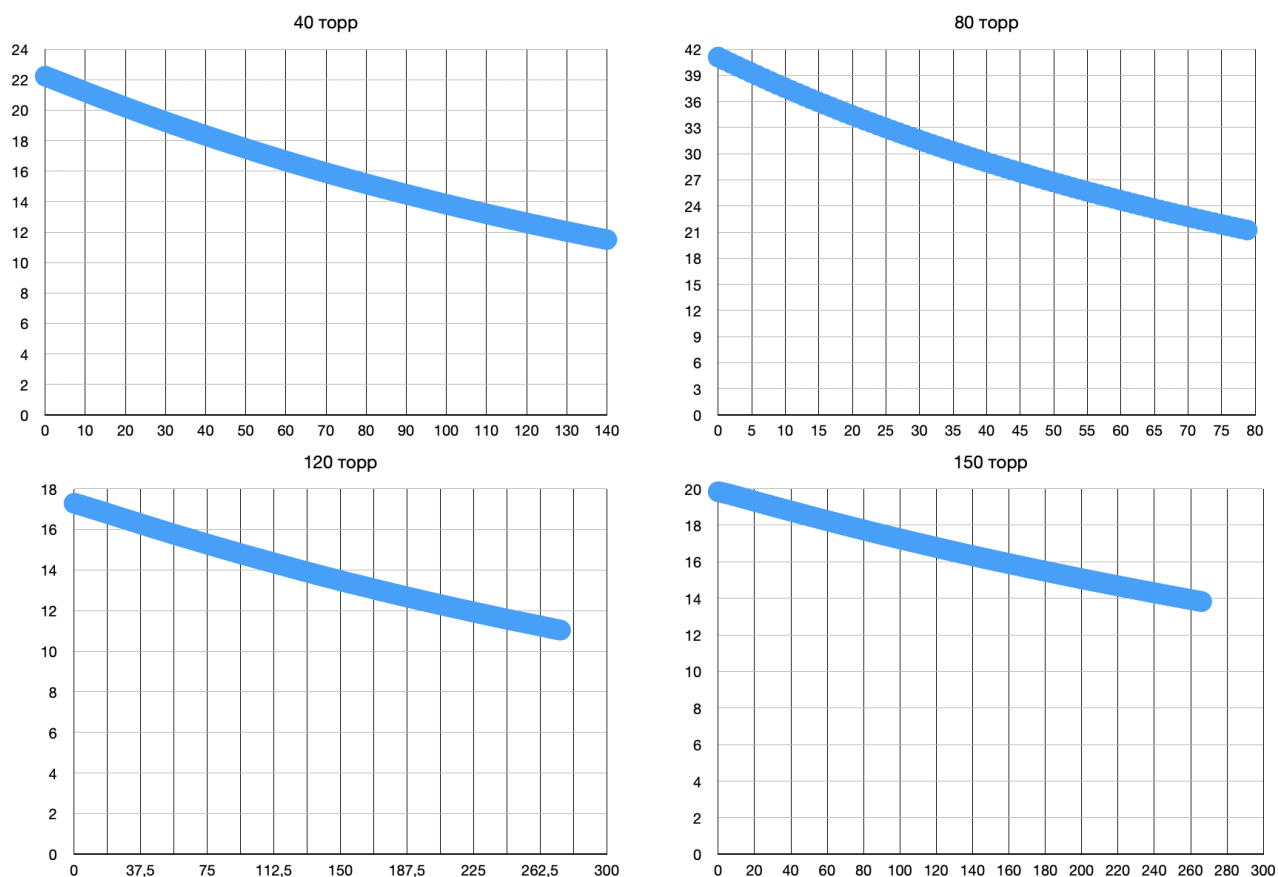
2. Приведем установку в рабочее состояние, как указано в учебном пособии.

3. Проведем измерения для 40, 80, 120 и 150 торр. Так как количество измерений >200 , они будут лишь в виде графика.

2.2 Обработка

4. Заметим, что все зависимости получились экспоненциальные. Построим зависимости $\ln V(t)$.

5. Посчитаем коэффициент наклона для каждого из случаев ($V_0 = 1 \text{ В}$):



$\Delta P, \text{ торр}$	$\frac{\partial(\ln V/V_0)}{\partial t} \cdot 10^{-4}, \text{ с}^{-1}$	$\tau, \text{ с}$
40	-47	212
80	-84	119
120	-16	625
150	-14	714

6. По (4) определим коэффициент взаимной диффузии:

$$D_{40} = \frac{1}{\tau} \frac{VL}{2S} = (8,9 \pm 0,1) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}},$$

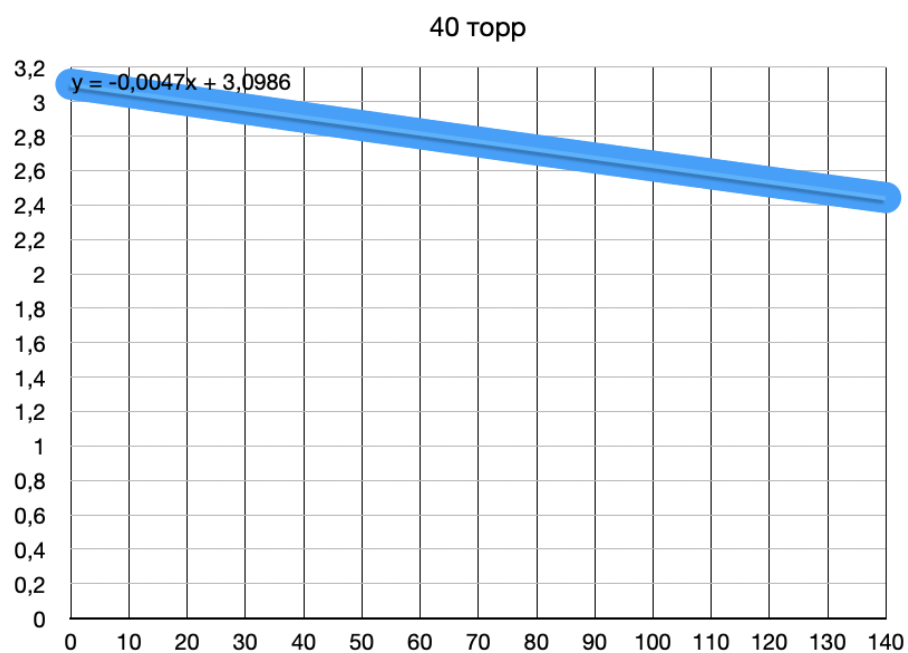
$$D_{80} = \frac{1}{\tau} \frac{VL}{2S} = (15,9 \pm 0,3) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}},$$

$$D_{120} = \frac{1}{\tau} \frac{VL}{2S} = (3,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}},$$

$$D_{150} = \frac{1}{\tau} \frac{VL}{2S} = (2,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

7. Построим график $D(\frac{1}{P})$.

По уравнению находим значение диффузии при атмосферном давлении должно быть $D_{\text{атм}} = 0,66 \text{ м}^2/\text{с}$, что очень близко к табличному.



3 Выводы

Определена зависимость коэффициента диффузии от давления. Несмотря на то что зависимость строилась по трем точкам, она получилась достаточно точной. Коэффициент диффузии при атмосферном давлении получился $D_{\text{атм}} = 0,66 \text{ м}^2/\text{с}$, что совпадает с табличным.

