

Лабораторная работа 2.2.1

Исследование взаимной диффузии газов

Сидорчук Максим Б01-204

18 мая 2023 г.

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. Введение

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.

Диффузия в системе, состоящей из двух компонентов a и b (бинарная смесь), подчиняется закону Фика: плотности потока компонентов $j_{a,b}$ (количество частиц, пересекающих единичную площадку в единицу времени) пропорциональны градиентам их концентраций $\nabla n_{a,b}$, что в одномерном случае можно записать как

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

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 сосуда ($\partial n / \partial x = 0$).

В случае работы с данной установкой можно считать, что диффузионный поток одинаков в любом сечении трубки, соединяющей сосуды V_1 и V_2 . Следовательно:

$$J = -DS \frac{n_1 - n_2}{l} \quad DS \frac{n_1 - n_2}{l} = -V_1 \frac{dn_1}{dt} = V_2 \frac{dn_2}{dt}$$
$$\frac{dn_1 - dn_2}{dt} = -\frac{n_1 - n_2}{l} DS \left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \right) \Rightarrow n_1 - n_2 = (n_1 - n_2)_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

В данной работе исследуется взаимная диффузия гелия и воздуха. Давление P и температура T в условиях опыта предполагаются неизменными: $p = (n_{He} + n_v)kT$, где n_{He} и n_v – концентрации (объёмные плотности) диффундирующих газов. Поэтому для любых изменений концентраций справедливо $\Delta n_{He} = -\Delta n_v$. Следовательно, достаточно ограничиться описанием диффузии одного из компонентов, например гелия n_{He} :

$$j_{He} = -D \frac{\partial n_{He}}{\partial x}.$$

Приведём теоретическую оценку для коэффициента диффузии. В работе концентрация гелия, как правило, мала ($n_{He} \ll n_v$). Кроме того, атомы гелия существенно легче молекул, составляющих воздух ($\mu_{He} \ll \mu_{O_2}, \mu_{N_2}$), значит и 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

$$D = \frac{1}{3} \lambda \bar{v},$$

где $\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$ – средняя тепловая скорость частиц примеси, $\lambda = \frac{1}{n_0\sigma}$ – их длина свободного пробега, n_0 – концентрация рассеивающих центров (фона), σ – сечение столкновения частиц примеси с частицами фона.

Таким образом, теория предсказывает, что коэффициент диффузии бинарной смеси обратно пропорционален давлению в системе $D \propto 1/P$, и не зависит от пропорций компонентов, что и предлагается проверить в работе экспериментально.

1.1. Экспериментальная установка

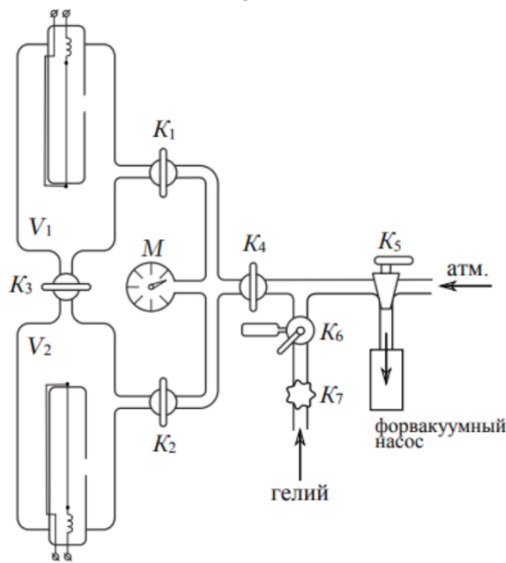


Рис. 1: Схема установки

Для исследования взаимной диффузии используется следующая установка:

Здесь V_1, V_2 – два сосуда с примерно равным объемом, в которые мы будем загонять воздух и гелий.

Данная конструкция позволяет провести диффузию, которая возможна только при равенстве давлений.

Основное оборудование, с помощью которого мы будем снимать измерения – датчики теплопроводности, через которые пропускают ток. Они подключены к мосту, который позволяет нам устанавливать начальное равновесное состояние.

При изменении концентрации в колбах вольтметр покажет нам разность напряжений на датчиках, что, из-за их конструкции, означает разность концентраций.

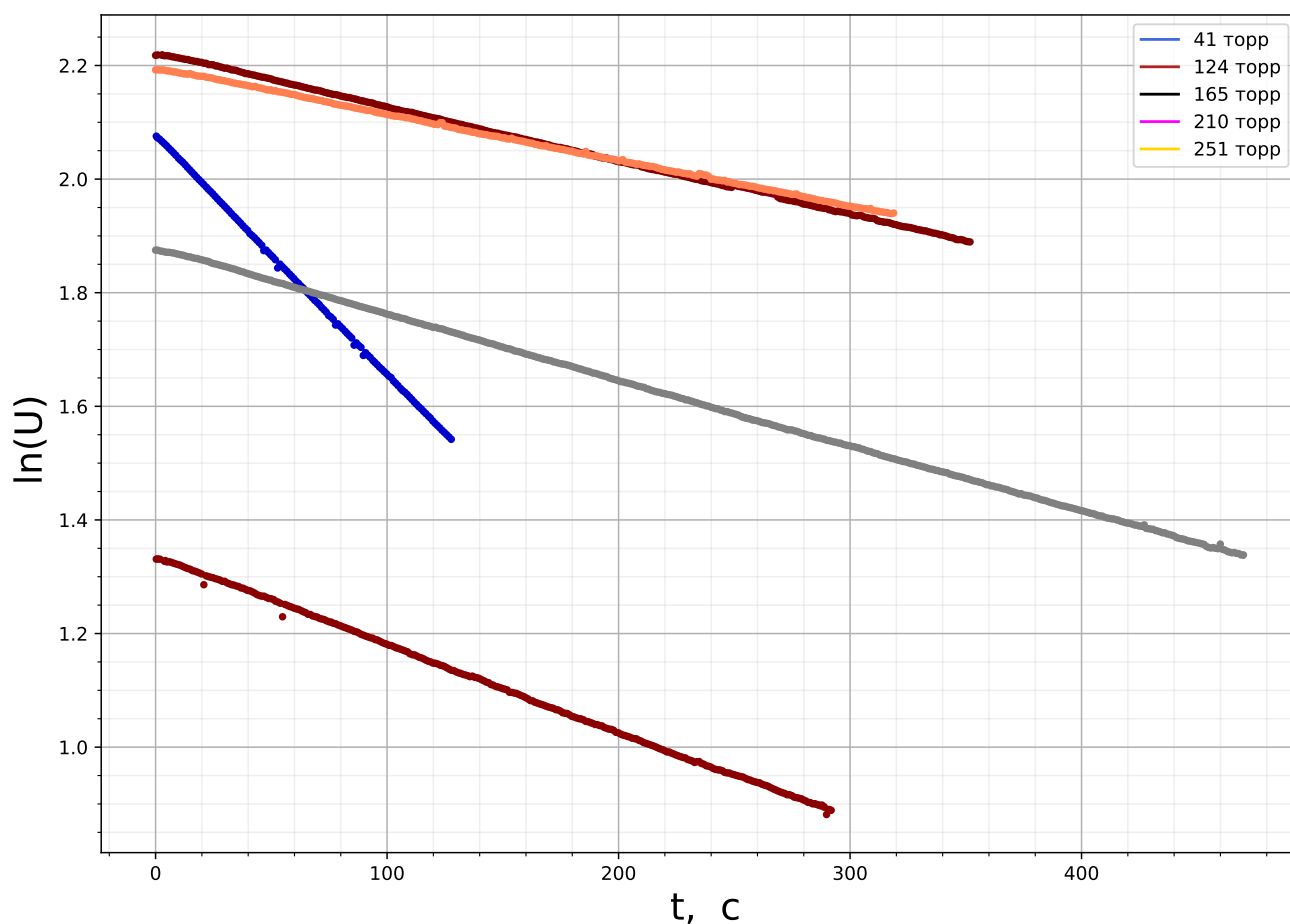
С помощью изменения напряжения мы и будем изучать процесс диффузии, т.к. во время ее протекания концентрации газов начинают устанавливаться, что заметно на графике разницы напряжений от времени.

2. Выполнение

1. Для смеси гелий-воздух исследуем зависимость коэффициента взаимной диффузии от начального давления в системе. Для этого будем фиксировать с помощью компьютера в лаборатории зависимость показаний вольтметра от времени, прошедшего с начала эксперимента. Из-за объема данных, полученных в результате этой работы, приведение их здесь не представляется возможным. Эксперимент проводился при атмосферном давлении $P = 752.8 \text{ торр}$.

2. По полученным данным построим графики зависимостей логарифма напряжения от времени. Проверим то, что процесс диффузии подчиняется закону:

$$U = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}.$$



3. Графики линейны, следовательно у нас действительно происходит диффузия. Далее мы можем найти τ как коэффициент наклона. Находить будем по МНК. В нашем случае:

$$\ln U = a + kt$$

4. Проведем расчеты для каждого значения давления, получим таблицу:

P , торр	k , с^{-1}
41	(-0.0259 ± 0.004)
124	(-0.0047 ± 0.0003)
165	(-0.0058 ± 0.0004)
210	(-0.0074 ± 0.0006)
251	(-0.0064 ± 0.0006)

5. Далее посчитаем коэффициенты взаимной диффузии для различных давлений по формуле:

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

$$\sigma_D = D \sqrt{\left(\frac{\sigma_k}{a}\right)^2 + \left(\frac{3\sigma_V}{2V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{L/S}}{L/S}\right)^2}$$

Параметры установки : $V_1 = V_2 = V = (800 \pm 5) \text{ см}^3$, $\frac{L}{S} = (15.0 \pm 0.1) \text{ см}^{-1}$.

Построим график зависимости $D(P^{-1})$

P , торр	D , см ² /с	σ_D , см ² /с	P^{-1} , торр ⁻¹ * 10 ⁻³	$\sigma_{P^{-1}}$, торр ⁻¹ * 10 ⁻³
40	12.68	0.61	25.00	2.3
124	4.05	0.37	8.07	0.9
165	3.31	0.31	6.06	0.6
210	2.40	0.28	4.76	0.4
251	1.91	0.24	3.98	0.4

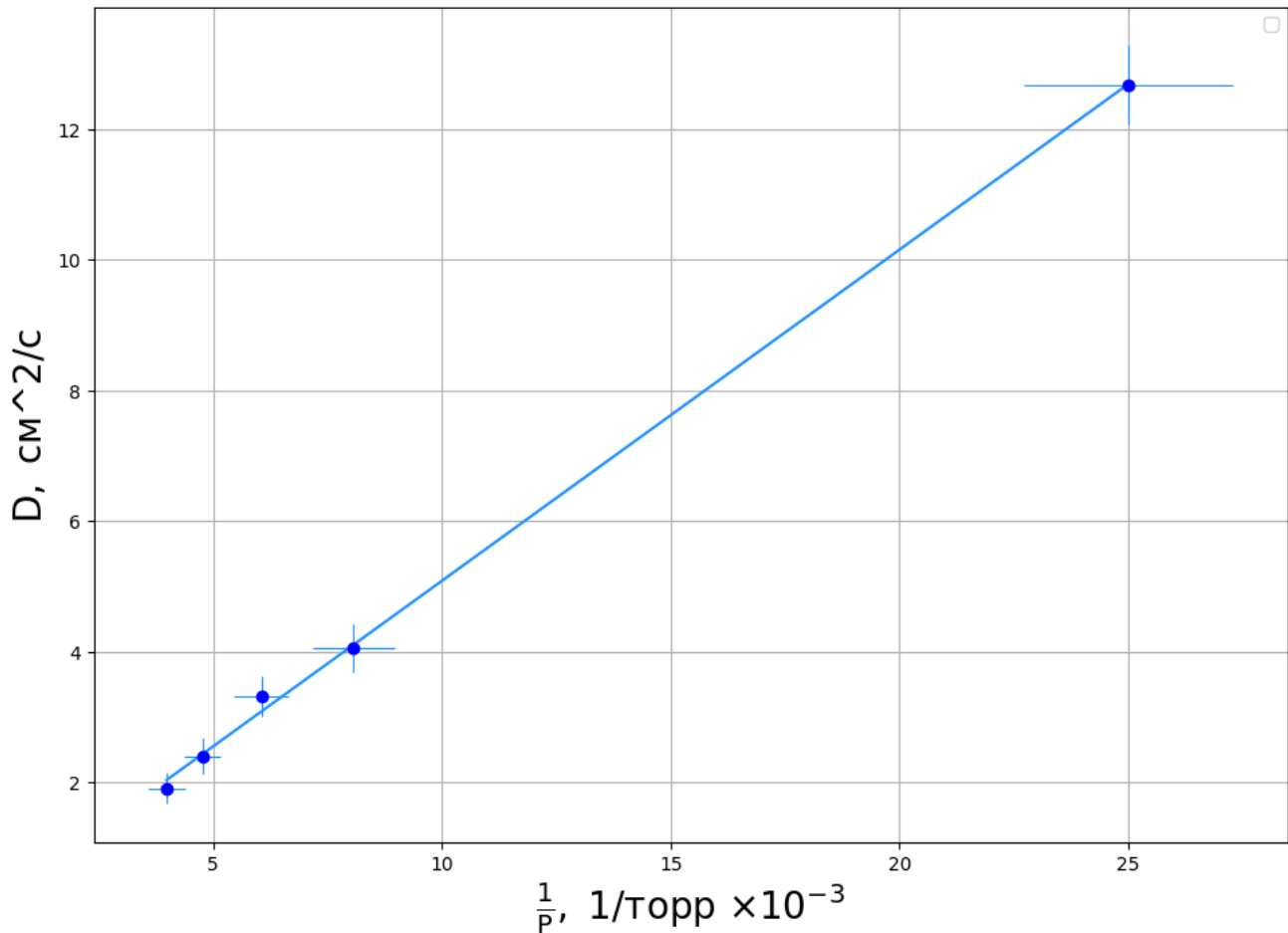


Рис. 2: Зависимость D от $\frac{1}{P}$

По графику видно, что точки достаточно неплохо ложатся на прямую. Рассчитаем коэффициент диффузии при атм давлении, экстраполировав зависимость $D(\frac{1}{P})$ до точки соответствующей атм давлению:

$$D = 0.67 \pm 0.06 \frac{c^2}{c}$$

$$D_{\text{табл}} = 0.57 \frac{c^2}{c}$$

Как видим, табличное значение попадает в погрешность найденного значения, что свидетельствует о неплохом качестве проведения эксперимента.