

Московский Физико-технический Институт
(Национальный исследовательский университет)

Отчет выполнении работы 2.2.1

Исследование взаимной диффузии газов

Выполнили студентки 1 курса
ФБМФ, группа Б06-103
Попеску Полина
Фитэль Алёна

Долгопрудный, 2022 г.

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

2 Теоретические сведения

Диффузия - самопроизвольное взаимное проникновение веществ друг в друга, происходящее вследствие хаотичного теплового движения молекул. В системе, состоящей из двух компонентов, плотность потока вещества в результате взаимной диффузии описывается 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, j_a, j_b - плотности потока частиц соответствующего сорта (количество частиц, пересекающих единичную площадку в единицу времени).

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

Проведём теоретическую оценку величины коэффициента взаимной диффузии. В работе мала концентрация гелия, более того, масса атомов гелия много меньше массы молекул, составляющих воздух, 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

$$D = \frac{1}{3} \lambda_{He} \bar{v}, \quad (2)$$

где $\lambda_{He} = \frac{1}{n_\Sigma \sigma}$, где $n_\Sigma = n_{He} + n_v = \frac{P}{k_B T}$ - длина свободного пробега частиц гелия, σ - среднее сечение столкновения частиц гелия с воздухом, $\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi\mu}}$ - средняя тепловая скорость.

Таким образом, теоретическая оценка предполагает, что коэффициент диффузии не зависит от пропорция элементов, а обратно пропорционален давлению $D \propto \frac{1}{P_\Sigma}$.

Рассмотрим подзадачу о диффузии в соединительной трубке. Предположим сперва, что концентрации примеси (гелия) на её торцах поддерживаются постоянными и равными n_1 и n_2 соответственно. Тогда через некоторое время в трубке установится стационарный поток частиц, одинаковый в каждом сечении трубки (в противном случае, если бы поток зависел от x , частицы бы накапливались в трубке, и процесс перестал бы быть стационарным). Применяя закон Фика в трубке, получим

$$j = -D \frac{\partial n}{\partial x} = Const \quad (3)$$

Следовательно, распределение концентрации в трубке $n(x)$ - линейная функция:

$$n(x) = \frac{\Delta n}{L} x \quad (4)$$

и плотность потока частиц всюду постоянна и равна

$$j = -D \frac{\Delta n}{L} \quad (5)$$

где $\Delta n = n_2 - n_1$ - разность концентраций гелия на концах трубки.

Так как процесс стационарный, то справедливо:

$$\frac{dN_1}{dt} = jS, \quad \frac{dN_2}{dt} = -jS \quad (6)$$

Тогда получаем:

$$\frac{d(\Delta n)}{t} = -\frac{\Delta n}{\tau}, \quad \text{где } \tau = \frac{1}{2} \frac{VL}{DS} \quad (7)$$

Интегрируя, получаем:

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-t/\tau} \quad (8)$$

где n_0 — разность концентраций примеси в сосудах в начальный момент времени

Так как $U \propto \Delta k \propto \Delta n$, то:

$$U = U_0 e^{-t/\tau} \quad (9)$$

где U_0 — показание гальванометра в начальный момент времени.

3 Экспериментальная установка

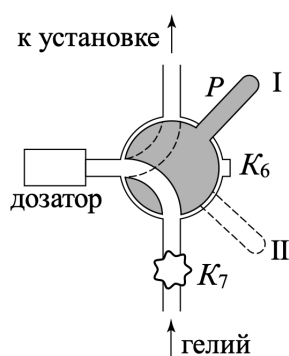
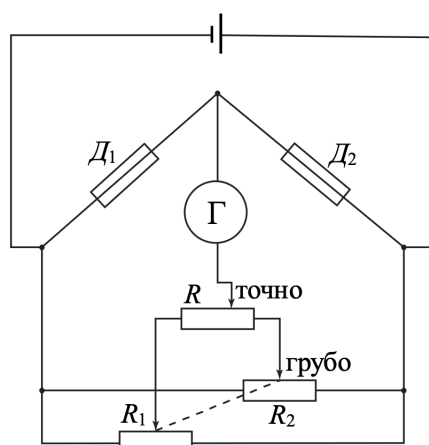
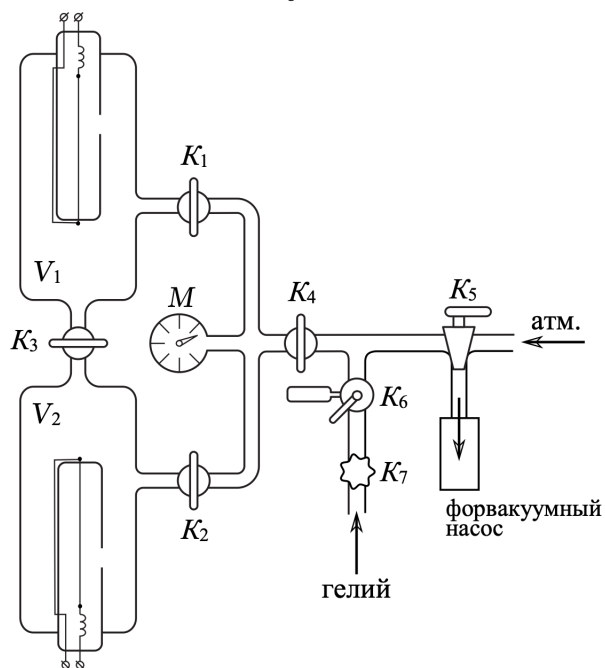
Установка состоит из двух сосудов V_1 и V_2 , соединённых краном K_3 , форвакуумного насоса, манометра М и системы напуска гелия, состоящей из кранов K_6, K_7 . Кран K_5 позволяет соединять форвакуумный насос либо с установкой, либо с атмосферой. Сосуды V_1 и V_2 соединены трубкой длины l и сечения S . Сосуды заполнены смесь двух газов при одинаковом давлении, но с различной концентрацией компонентов. Вследствие взаимной диффузии концентрации каждого из компонентов с течением времени выравниваются. Между форвакуумным насосом и краном K_5 вставлен предохранительный баллон, защищающий кран и установку при неправильной её эксплуатации от попадания форвакуумного масла из насоса. Сосуды V_1 и V_2 можно соединять как с системой напуска гелия, так и с форвакуумным насосом. Для этого служат краны K_1, K_2, K_4, K_5 . Манометр М регистрирует давление газа, до которого заполняют тот или иной сосуды. Кран K_4 изолирует форвакуумный насос от установки. Для подачи воздуха в установку служит кран K_5 .

Для измерения разности концентраций газов используется мостовая схема. Здесь D_1, D_2 - датчики теплопроводности, расположенные в сосудах V_1 и V_2 . Сопротивления R_1, R_2, R служат для балансировки моста. В одну из диагоналей моста включен гальванометр, к другой подключается небольшое постоянное напряжение. Сопротивления R_1 и R_2 спарены (их подвижные контакты находятся на общей оси) и изменяются одновременно при повороте ручки грубой регулировки. Точная балансировка выполняется потенциометром R.

Гелий содержится в баллоне под давлением, превышающим атмосферное. Для предотвращения избыточного расхода гелия и его неконтролируемого проникания в установку предусмотрен металлический кран (K_7), отделяющий её от баллона с гелием. Для подачи малых порций гелия предусмотрен двух-ходовый кран с дозатором.

Параметры установки: $V_1 = V_2 = V = (775 \pm 10) \text{ см}^3$; $\frac{L}{S} = (5.3 \pm 0.1) \text{ см}^{-1}$.

Схема установки

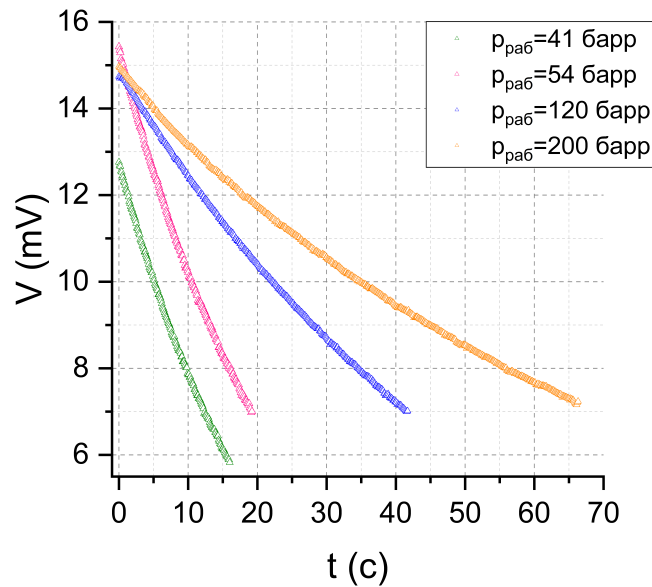


4 Обработка результатов измерений

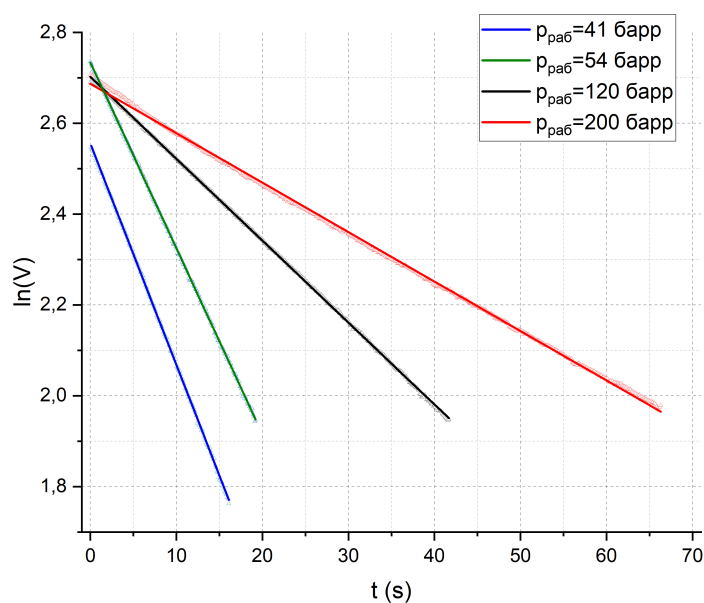
1. Сбалансируем измерительный мост при предполагаемом «рабочем» давлении.
2. Заполним установку рабочей смесью: в сосуде V_1 находится воздух, а в сосуде V_2 - смесь воздуха с гелием. Давление должно быть одинаковым и равным рабочему давлению P_Σ .
3. Откроем кран K_3 . Начнется процесс диффузии. Измерения будем продолжать до тех пор,

пока напряжение не упадет примерно на 50%.

4. Повторим измерения 5 раз при различных значениях рабочего давления.
5. Построим графики зависимостей изменений показания вольтметра от времени. Наблюдается экспоненциальная зависимость.



6. Построим графики зависимостей показаний вольтметра от времени в логарифмическом масштабе.



Рассчитаем коэффициент взаимной диффузии для различных значений рабочего давления.

Согласно формуле (7):

$$D = k \frac{VL}{2S}$$

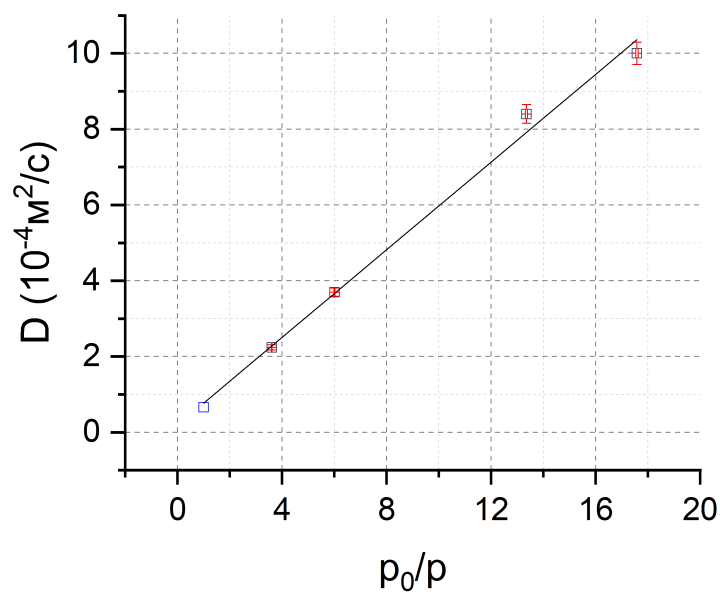
$$\frac{\Delta D}{D} = \sqrt{\left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L/S}{L/S}\right)^2},$$

где k - коэффициент наклона прямой.

Таким образом, находим:

p , барр	41	54	120	200
k , $10^{-3}/\text{с}$	-4,87	-4,09	-1,8	-1,09
σ_k , $10^{-3}/\text{с}$	0,006	0,003	0,001	0,001
D , $10^{-4}\text{м}^2/\text{с}$	10,00	8,40	3,70	2,24
σ_D , $\text{м}^2/\text{с}$	0,29	0,25	0,11	0,07
p_0/p	17,58	13,35	6,01	3,60
$\sigma_{p_0/p}$	0,05	0,03	0,02	0,01

7. Построим график зависимости коэффициента диффузии от обратного давления в координатах $D(\frac{p_0}{p})$. Экстраполируем график к атмосферному давлению, оцениваем соответствующий коэффициент диффузии.



Получаем $k = (0.58 \pm 0.03)$

Таким образом, для атмосферного давления в лаборатории ($P = 720,848$ торр)

$$D = (0.66 \pm 0.03) \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$$

Табличное значение при атмосферном давлении: $D = 0,72 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$.

8. Оценим длину свободного пробега атомов гелия в воздухе λ_{He} .

$$D = \frac{1}{3} \lambda_{He} \bar{v}, \text{ где } \bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}$$

Отсюда получаем:

$$\lambda_{He} = 3D\sqrt{\frac{\pi\mu}{8RT}} \approx (1.58 \pm 0.07) \cdot 10^{-7}\text{м}$$

$$\frac{\Delta\lambda_{He}}{\lambda_{He}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2} \approx 4\%$$

9. Оценим эффективное сечение столкновений атомов гелия с молекулами воздуха σ .

$$n_{\Sigma} = n_{He} + n_{\text{в}} = \frac{P_{\Sigma}}{k_{\text{Б}}T}, \sigma = \frac{1}{\lambda_{He}n_{\Sigma}}$$

$$\sigma = (2.62 \pm 0.12) \cdot 10^{-19}\text{м}^2$$

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\lambda_{He}}{\lambda_{He}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{\Sigma}}\right)^2} \approx 5\%$$

5 Вывод

В данной работе было проверено, что закон $U = U_0 \cdot e^{\frac{-t}{\tau}}$ выполняется.

Был найден коэффициент диффузии гелия в воздухе. Измеренный коэффициент диффузии $D = (0.66 \pm 0.03) \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ отличается от табличного $D_{\text{табл}} = 0.72 \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ на 9%.

Кроме того, была оценена длина свободного пробега атомов гелия в воздухе и эффективное сечение столкновений атомов гелия с молекулами воздуха: $\lambda_{He} = (1.58 \pm 0.07) \cdot 10^{-7}\text{м}$, $\sigma = (2.62 \pm 0.12) \cdot 10^{-19}\text{м}^2$. Параметры системы могут сильно отличаться, поэтому сравнивать эти величины с табличными не получится.