

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Факультет общей и прикладной физики

Отчет о выполнении работы 2.2.1. Исследование взаимной диффузии газов

Выполнил:
Студент гр. Б02-304
Головинов. Г.А.



Долгопрудный, 2024

Аннотация

Цель работы: получить зависимость коэффициента диффузии от давления

В работе используются: компьютеризированная установка для измерений, манометр, барометр (для определения атмосферного давления).

Основные теоретические сведения

Диффузия — самопроизвольное взаимное проникновение веществ друг в друга, происходящее вследствие теплового движения молекул.

Диффузия двух веществ подчиняется закону Фика: плотности потока компонентов $j_{a,b}$ — количество частиц, пересекающих единичную площадку в единицу времени — пропорциональны градиентам концентраций $\nabla n_{a,b}$. В одностороннем случае:

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

где D — коэффициент взаимной диффузии.

В нашем опыте исследуется взаимная диффузия гелия и воздуха. Причем мы считаем, что давление и температура в процессе опыта не изменяется, поэтому для любых изменений справедливо $\Delta n_1 = -\Delta n_2$, где индексом «1» будем обозначать воздух, «2» — гелий. Тогда достаточно описать диффузию одного компо-

нента, например воздуха:

$$j_1 = -D \frac{\partial n_1}{\partial x} \quad (1)$$

В работе мы используем малые концентрации гелия, поэтому можно приблизить $n_2 \ll n_1$. Кроме того, гелий намного меньше воздуха ($\mu_{\text{He}} \ll \mu_{\text{N}_2}, \mu_{\text{O}_2}$), поэтому скорость частиц гелия много больше скорости частиц воздуха, поэтому его можно вообще считать стационарным. В таком случае коэффициента диффузии равен:

$$D = \frac{1}{3} \lambda \bar{v} \quad (2)$$

где $\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$ — средняя тепловая скорость частиц, $\lambda = \frac{1}{n\sigma}$ — длина свободного пробега, n — концентрация фона, σ — сечение столкновения примеси с фоном.

Таким образом, $D \sim \lambda \sim \frac{1}{n} \sim \frac{1}{p}$.

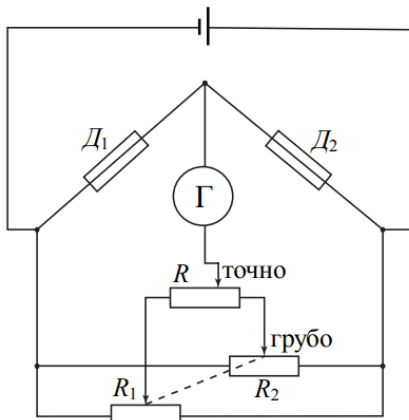


Рис. 1: Схема моста

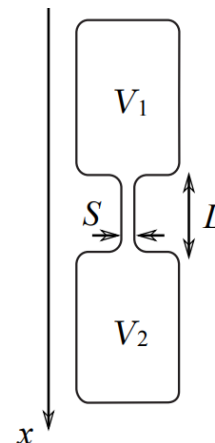


Рис. 2: Расположение сосудов с веществами

Схема эксперимента

Если на концах трубки, соединяющей сосуда, поддерживается постоянная концентрация гелия (это можно принять так, выходит из предыдущих приближений), то распределение концентрации в трубке $n(x)$ — линейная функция:

$$n(x) = \frac{\Delta n}{L}x \quad (3)$$

где L — длина трубки, $\Delta n = n_2 - n_1$ — разница концентраций гелия на концах трубки.

Плотность потока частиц всюду постоянная и равна:

$$j = -D \frac{\Delta n}{L} \quad (4)$$

Концентрации на концах n_1, n_2 меняются со

временем (так как гелий переходит из одного сосуда в другой). Предположим, что изменение мало и за это время успевает установиться стационарное течение. $N_1 = n_1 V$, $N_2 = n_2 V$ — полное число частиц. Через него можно выразить поток:

$$\frac{dN_1}{dt} = jS, \quad \frac{dN_2}{dt} = -jS \quad (5)$$

Тогда можно выразить скорость изменения Δn :

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau}, \quad \tau = \frac{1}{D} \cdot \frac{VL}{2S} \quad (6)$$

Интегрируя, получим $\Delta n = \Delta n_0 \exp(-t/\tau)$. Отсюда видно, что τ — характерное время выравнивания концентраций между сосудами.

Обработка результатов измерений

Для измерения разности концентраций применяются датчики теплопроводности. Теплопроводность κ зависит от концентрации при малых ее изменениях следующим образом:

$$\Delta \kappa = \kappa(n_2) - \kappa(n_1) \approx \text{const} \cdot \Delta n \quad (7)$$

Для разных концентраций гелия соответственно разная теплопроводность смеси, соответственно разная температура нити (если теплопроводность хуже, значит температура повысится). Повышение (понижение) температуры нити можно измерить с помощью мостовой схемы, показанной на рисунке 1.

При незначительных отличиях в составах смесей показания вольтметра, присоединенного по диагонали в мост будут пропорциональны разнице теплопроводности, которая пропорциональна разнице концентраций:

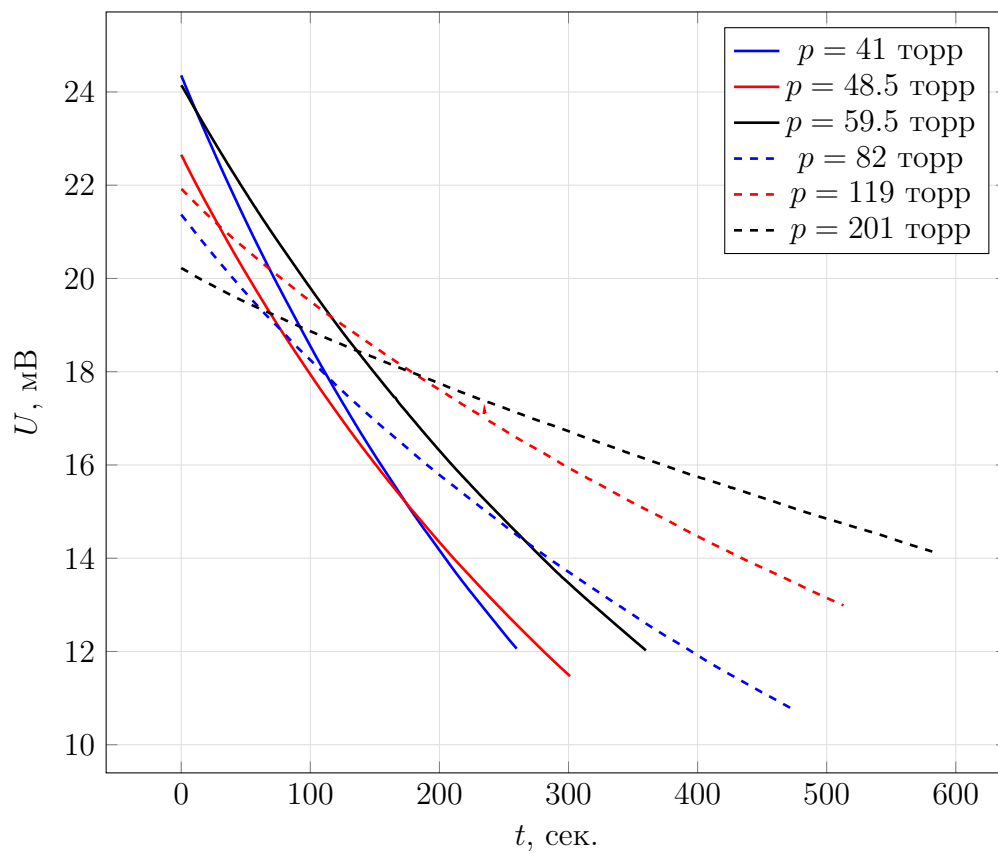
$$U \sim \Delta \kappa \sim \Delta n$$

Тогда получим зависимость показания вольтметра от времени:

$$U(t) = U_0 \exp(-t/\tau) \quad (8)$$

где U_0 — начальное показание вольтметра.

Зависимость напряжения на диагонали моста от времени

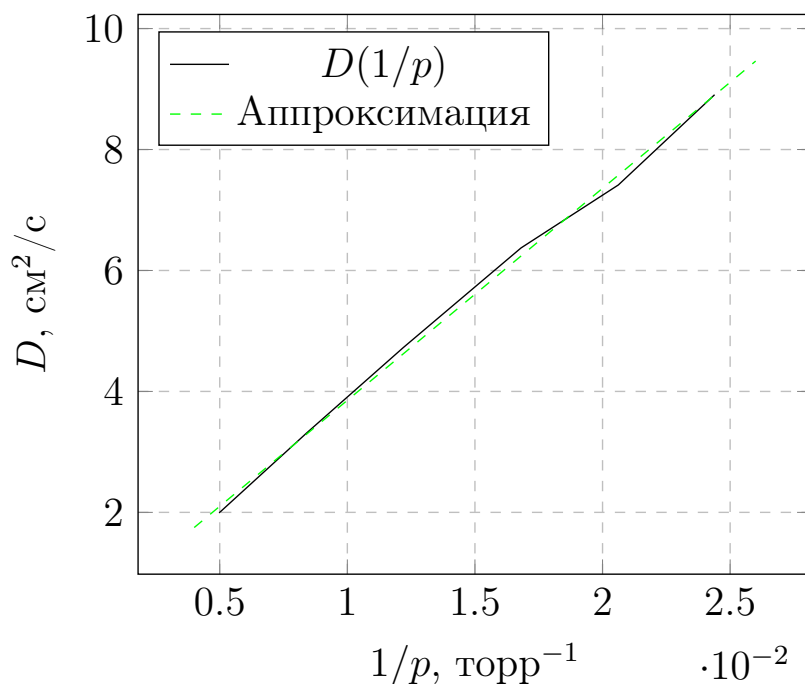


Аппроксимируя зависимость $U(t)$ с помощью функции времени: $U_0 e^{-t/\tau}$ получим следующие значения τ :

41	торр :	$\tau = 370.5$ с
48.5	торр :	$\tau = 445.1$ с
59.5	торр :	$\tau = 517.8$ с
82	торр :	$\tau = (698.3 \pm 0.3)$ с
119	торр :	$\tau = (996.4 \pm 1.4)$ с
201	торр :	$\tau = (1651.7 \pm 1.6)$ с

По формуле (6) получим значения коэффициента диффузии при различных давлениях и построим его зависимость в осях $D(1/p)$:

Зависимость коэффициента диффузии от $1/p$



Видно, что зависимость получилась линейная, что согласуется с теорией: $D \sim \lambda \bar{v} \sim (1/p)\sqrt{T} \sim (1/p)$

коэффициент взаимной диффузии гелия и воздуха:

$$D = 0.80 \pm 0.08 \text{ cm}^2/\text{s}$$

При аппроксимации линейной зависимостью $D = k \cdot (1/p) + b$ получим коэффициент наклона $k = 350 \pm 6$. При экстраполяции к атмосферному давлению $p_0 \approx 760$ торр получим коэффи-

Полученное значение немного отличается от табличного, однако практически попадает в интервал $\pm 2\sigma$, что говорит о недооценке погрешности.

Выводы

В результате работы была получена зависимость коэффициента диффузии от давления, в осях $D(1/p)$ зависимость получилась линейная, что соотносится с теорией. Экстраполируя линейную зависимость к атмосферному

давлению был получен коэффициент взаимной диффузии гелия—воздуха. Результат несколько отличается от табличного, однако отклонение не существенное. Погрешность, скорее всего, недооценена.