

**Отчет о выполнении лабораторной
работы 2.2.1 "Исследование взаимной
диффузии газов"**

Калашников Михаил, Б03-205

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

В работе используются:

- измерительная установка ($V_1 = V_2 = 800 \pm 5 \text{ см}^3$, $l/S = 15,0 \pm 0,1 \frac{1}{\text{см}}$);
- форвакуумный насос;
- баллон с газом (гелий);
- манометр ($\sigma_P = 0,005 \cdot 760 \text{ торр} = 3,8 \text{ торр}$);
- источник питания;
- магазин сопротивлений;
- гальванометр;
- секундомер;

1. Теоретическая часть

Диффузией называется самопроизвольное перемешивание молекул, происходящее вследствие их теплового движения. Плотность диффузионного потока любого компонента (т. е. количество вещества, проходящее в единицу времени через единичную поверхность) определяется законом Фика:

$$j = -D \frac{\partial n}{\partial x}$$

где D – коэффициент взаимной диффузии газов, а j – плотность потока частиц. Применяя этот закон к условиям нашего эксперимента совместно с законом сохранения вещества, можно получить уравнение, описывающее изменение разности концентраций от времени.

$$n_1 - n_2 = (n_1 - n_2)_0 e^{-t/\tau}, \quad \tau = \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \frac{l}{SD}$$

2. Экспериментальная установка

Для исследования взаимной диффузии газов и определения коэффициента диффузии используется установка, изображенная на рис. 1. Два сосуда с объемами V_1 и V_2 соединены трубкой длины l и сечения S . Сосуды заполнены смесью двух газов при одинаковом давлении, но с различной концентрацией компонентов. Вследствие взаимной диффузии концентрации каждого из компонентов в обоих сосудах с течением времени выравниваются.

Для измерения концентраций в данной установке применяются датчики теплопроводности D_1 , D_2 и используется зависимость теплопроводности газовой смеси от ее состава. Тонкая проволока радиуса r_{pr} , протянутая вдоль оси стеклянного цилиндра радиуса R_c , нагревается током. Тепло от проволоки к стенке цилиндра переходит главным образом вследствие теплопроводности газа, находящегося внутри цилиндра.

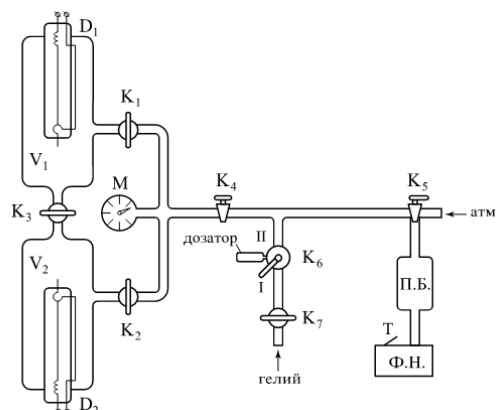


Рис. 1: Установка для исследования взаимной диффузии газов

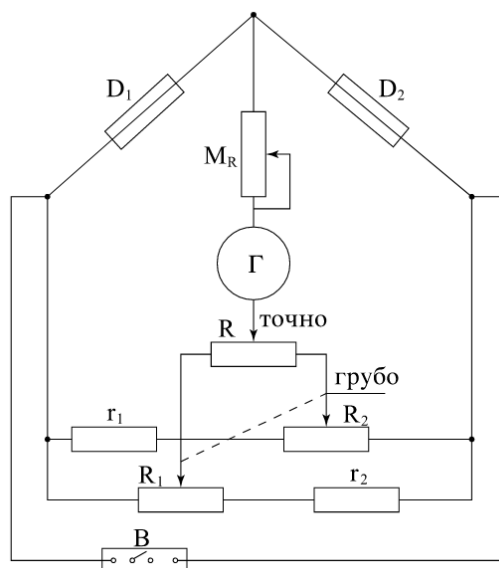


Рис. 2: Мостовая схема с датчиками теплопроводности для измерения разности концентраций газов

3. Проведение эксперимента

1. Ознакомимся с установкой. Изучим действие каждого из присутствующих на установке кранов, инструкцию работы с форвакуумным насосом.
2. Установка включена в сеть, откроем краны К1 - К3.
3. С помощью форвакуумного насоса откачаем воздух из установки. Выключим насос, не забыв соединить его с атмосферой.
4. Напустим в установку воздух до рабочего давления P . В начале экс-

перимента оно равно 40 торр. Сбалансируем мост, перекрыв краны К1 и К2.

5. Заполним верхнюю емкость гелием до давления, равного $0.2P$. Для этого откроем кран К7 и воспользуемся дозатором К6. Закрыв кран К1 и откачав гелий, оставшийся в патрубках, заполним нижнюю емкость воздухом из атмосферы до давления $1.75P$ с помощью крана К5. Далее дадим давления в обеих емкостях уравниваться, открыв для этого краны К1 и К2 на 30 секунд. Запишем установившееся давление.
6. Приступим к измерениям. Откроем кран К3 и сразу после этого запустим компьютерную программу. Будем продолжать процесс измерения, пока показания вольтметра не опустятся на 30-50%. Сохраним полученные измерения, указав установившееся давление.
7. Поднимем рабочее давление на 40 торр и повторим три последних пункта. Будем продолжать это вплоть до давления в 240 торр.

4. Обработка данных

8. Автоматизированные измерения позволили снять примерно 4000 точек за все время эксперимента, поэтому приводить их в отчете в виде таблицы не имеет смысла. По этим точкам мы построим зависимость $\ln V(t)$. В таблицу 1 внесем угловые коэффициенты полученных прямых k и вычисленные на основании последних коэффициенты взаимной диффузии D по формуле:

$$\ln P = -\frac{t}{\tau} + \ln P_0 = kt + \ln P_0$$

$$D = \frac{1}{\tau} \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \frac{l}{S} = -k \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \frac{l}{S}$$

9. Построим график зависимости $D(1/P)$. Продлим прямую до точки $(1/P_0; D_0)$, где P_0 – атмосферное давление, D_0 – коэффициент взаимной диффузии при атмосферном давлении.
10. Вычисли длину свободного пробега λ и размер молекулы r . Для этого воспользуемся формулами:

$$D_0 = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle, \quad \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$$

$$\lambda = \frac{3D_0}{\langle v \rangle} = 3D_0 \sqrt{\frac{\pi\mu}{8RT}}$$

$$\pi(2r)^2 \lambda n = 1, \quad n = \frac{P_0}{kT}$$

$$r = \frac{1}{2\sqrt{\pi\lambda n}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{kT}{\pi\lambda P_0}}$$

где k – постоянная Больцмана, P_0 – атмосферное давление, $T = 297 \pm 2$ К, μ – молярная масса гелия.

5. Расчет погрешностей

Найдем среднюю погрешность значения коэффициента взаимной диффузии:

$$\varepsilon_{D, \text{приб}} = \sqrt{\varepsilon_V^2 + \varepsilon_{\frac{1}{S}}^2} = 0,9\%, \text{ т.к. } V_1 = V_2 = V \text{ и } \sigma_{V_1} = \sigma_{V_2}$$

$$\varepsilon_{D, \text{случ}} = \langle \varepsilon_k \rangle = \left\langle \frac{\sigma_k}{k} \right\rangle = 0,1\%$$

$$\varepsilon_D = \sqrt{\varepsilon_{D, \text{приб}}^2 + \varepsilon_{D, \text{случ}}^2} = 0,9\%$$

Отсюда найдем погрешность D_0 :

$$D_0 \approx D \frac{P}{P_0}, \quad \varepsilon_{D_0} = \sqrt{\varepsilon_D^2 + \varepsilon_P^2} = 4,0\%$$

$$\text{где } \varepsilon_P = \sigma_P \left\langle \frac{1}{P} \right\rangle = 3,9\%$$

Таким образом:

$$D_0 = 0,81 \pm 0,03 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$$

Воспользуемся формулой погрешности косвенных измерения для определения погрешности λ и r .

$$\varepsilon_\lambda = \sqrt{\varepsilon_{D_0}^2 + \frac{1}{4}\varepsilon_T^2} = 4,0\%$$

$$\lambda = 195 \pm 8 \text{ нм}$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2} \sqrt{\varepsilon_\lambda^2 + \varepsilon_T^2} = 2,0\%$$

$$r = 129 \pm 3 \text{ пм}$$

6. Вывод

Полученные величины сходятся с значениями, приводимых в справочниках. Это свидетельствует корректности и точности проведенного эксперимента.

7. Приложения

P , торр	40	80	120	160	200	240
k , $10^{-3}/\text{с}$	-2,136	-1,005	-0,747	-0,553	-0,446	-0,386
D , $\text{см}^2/\text{с}$	12,82	6,03	4,48	3,32	2,68	2,32

Таблица 1: Вычисления коэффициента взаимной диффузии при различных давлениях

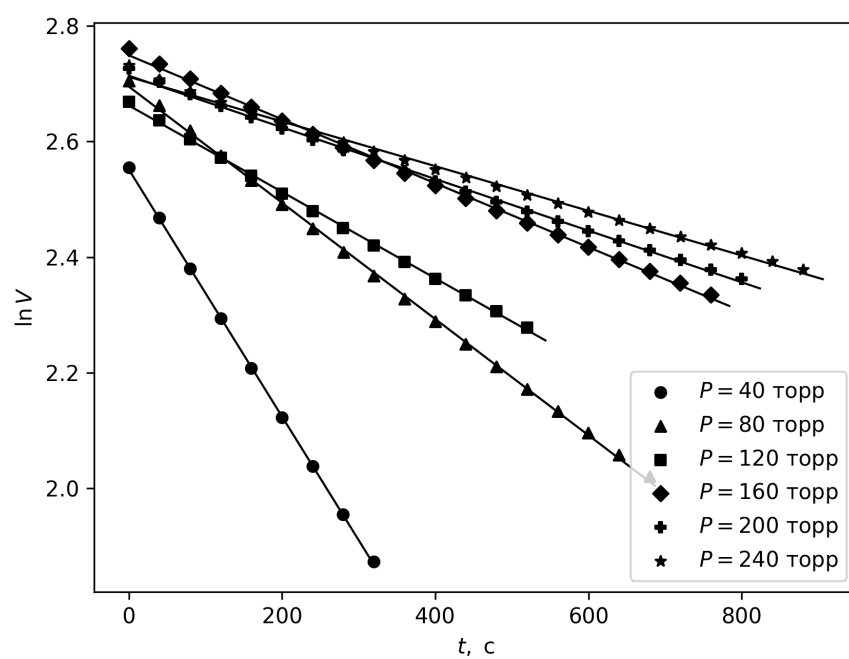


Рис. 3: График зависимости $\ln V(t)$

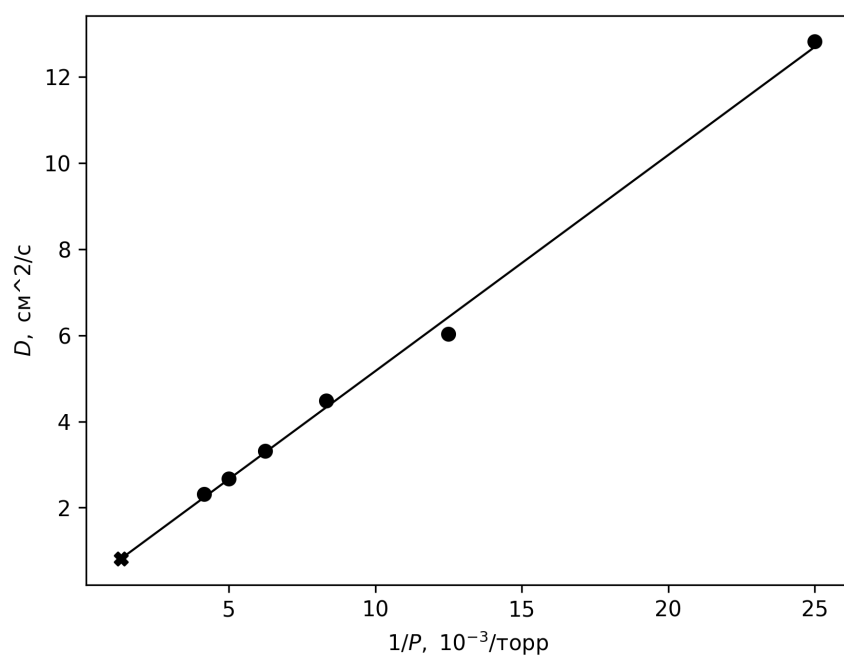


Рис. 4: График зависимости $D(1/P)$