

1.2.3 Исследование взаимной диффузии газов

Анна Назарчук Б02-109

1 Аннотация

Экспериментальное определение коэффициента взаимной диффузии с помощью датчиков теплопроводности при разных рабочих давлениях в системе и разных концентрациях газов.

2 Теоретические сведения

Закон Фика:

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

В опыте: диффузия гелия на стационарном воздухе:

$$D = \frac{1}{3} \lambda \bar{v}, \lambda = \frac{1}{n_0 \sigma}, \bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}} \quad (2)$$

В общем случае:

$$D = \frac{1}{3} \lambda \bar{v}, \lambda = \frac{1}{n_{\Sigma} \sigma}, n_{\Sigma} = n_{He} + n_{в} = \frac{P}{kT}, \bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi \bar{m}}} \quad (3)$$

Следовательно, $D \sim \frac{1}{p}$

3 Методика измерений

$$V_1 \approx V_2 \equiv V, LS \ll V \Rightarrow n(t) \quad (4)$$

Через некоторое время в трубе (рис. 1)

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

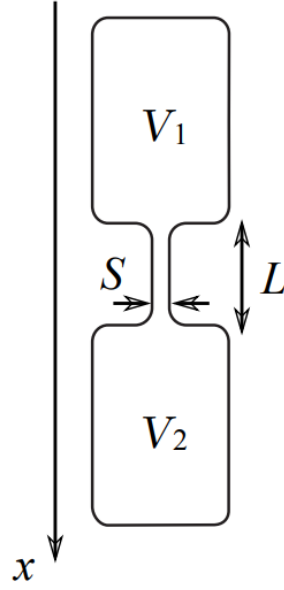


Рис. 1: Схема используемых в измерении сосудов

Для сосудов:

$$N_1 = n_1 V, N_2 = n_2 V, \frac{dN_1}{dt} = jS, \frac{dN_2}{dt} = -jS \quad (6)$$

$$\frac{(d\Delta n)}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau}, \tau = \frac{1}{D} \frac{VL}{2S} \quad (7)$$

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

Применимость:

$$\tau \gg \tau_{\text{диф}} = \frac{L^2}{2D}, \Rightarrow SL \ll V \quad (9)$$

Для теплопроводности (датчики в установке 2)

$$\Delta k = k(n_2) - k(n_1) \approx \text{const} \cdot \Delta n \quad (10)$$

Измерение разности теплопроводности с помощью измерения напряжения на гальванометре на мосту: при одной смеси в сосудах - баланс, при разных:

$$U \sim \delta k \sim \Delta n, U = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (11)$$

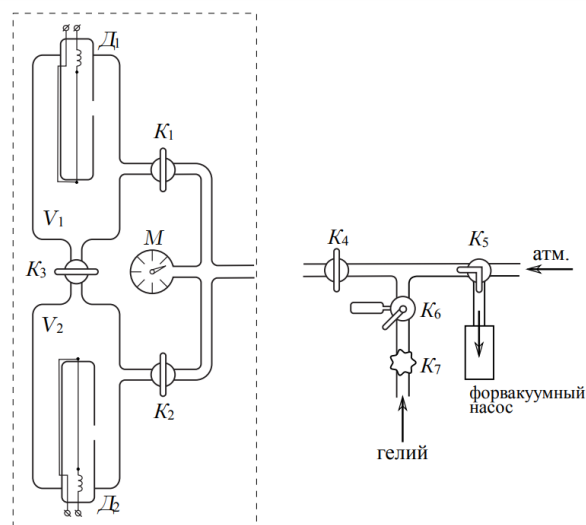


Рис. 2: Схема используемой в измерении установки

4 Используемое оборудование

Используемое оборудование в работе: измерительная установка, форвакуумный насос, баллон с газом, манометр, источник питания, магазин сопротивлений, компьютер. Схема установки представлена на рис. 2, 1, 3, 4. Мост включает в себя датчики теплопроводности, гальванометр и

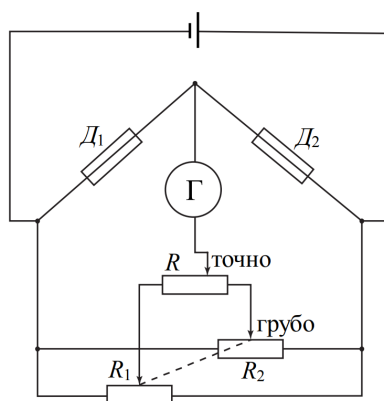


Рис. 3: Схема используемого в измерении моста

переменное сопротивление для балансировки моста. Погрешности приборов указаны в таблице 4.

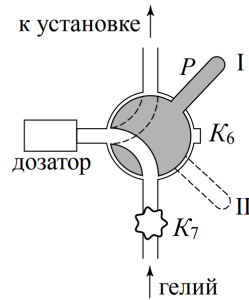


Рис. 4: Схема используемого в измерении дозатора

Таблица 1: Погрешности приборов

| Прибор | Гальванометр | Манометр |
|-------------|--------------|--------------------|
| Погрешность | 2,5% | 0.5 дел = 3.8 торр |

5 Обработка данных

Постоянные характеристики установки представлены в таблице 5. Рассмотрим сначала диффузию гелия на стационарном воздухе. Из измерений получили зависимость напряжения на гальванометре от времени при разных рабочих давлениях. Результаты измерений представлены в виде графиков (рис. 5, 6, 7, 8), масштаб логарифмический.

Для каждого давления посчитаем D :

$$D = -\frac{kVL}{2S} \quad (12)$$

k - угловой коэффициент наклона графика.

И погрешность D :

$$\sigma_D = D \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{L/S}}{L/S}\right)^2} \quad (13)$$

Наибольший вклад в погрешность вносит погрешность отношения L/S . Результаты в таблице 5.

Таблица 2: Постоянные параметры установки

| L/S , 1/см ² | V , см ³ | p_0 , торр |
|---------------------------|-----------------------|-----------------|
| 5.5 ± 0.5 | 1200 ± 30 | 756.2 ± 3.8 |

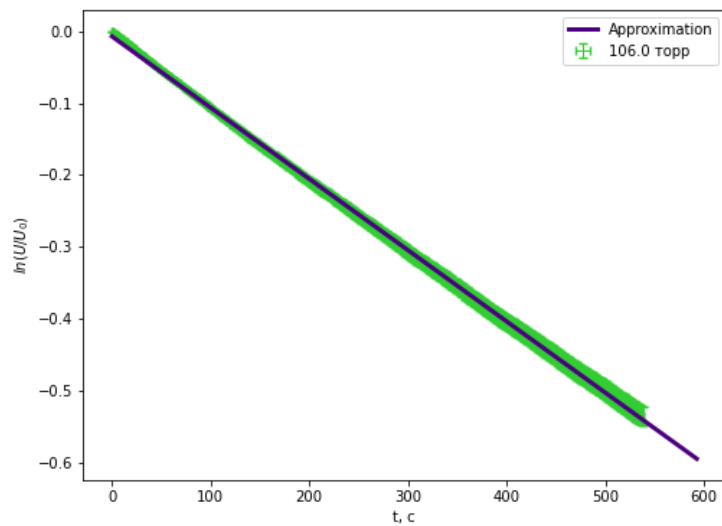


Рис. 5: Зависимость напряжения от времени при $p = 106$ торр

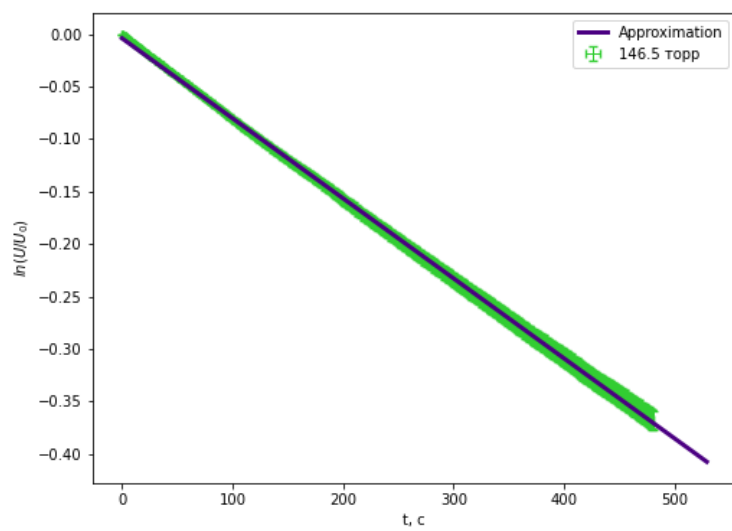


Рис. 6: Зависимость напряжения от времени при $p = 146.5$ торр

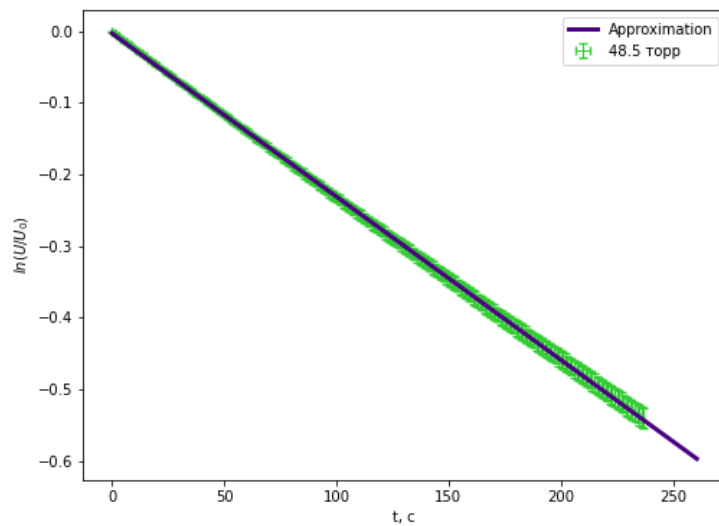


Рис. 7: Зависимость напряжения от времени при $p = 48.5$ торр

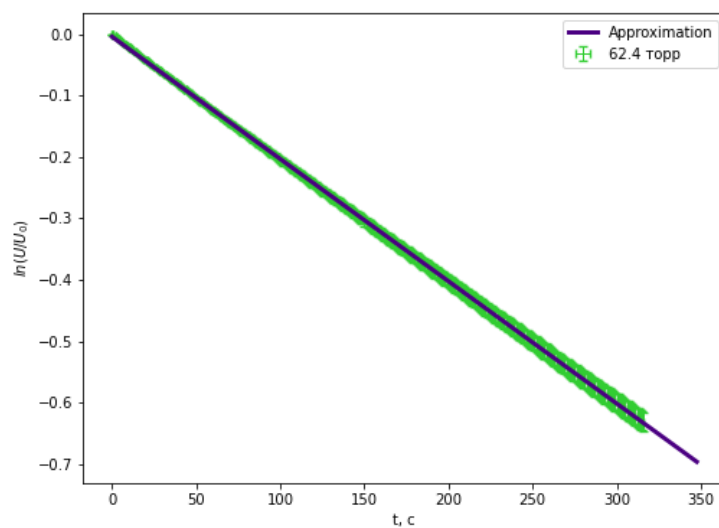


Рис. 8: Зависимость напряжения от времени при $p = 62.4$ торр

Таблица 3: Значения коэффициента взаимной диффузии при разных давлениях

| $D, \text{см}^2/\text{с}$ | $\sigma_D, \text{см}^2/\text{с}$ | $p, \text{торр}$ |
|---------------------------|----------------------------------|------------------|
| 6.571 | 0.62 | 62.4 |
| 3.27 | 0.308 | 106.0 |
| 2.517 | 0.237 | 146.5 |
| 7.515 | 0.709 | 48.5 |

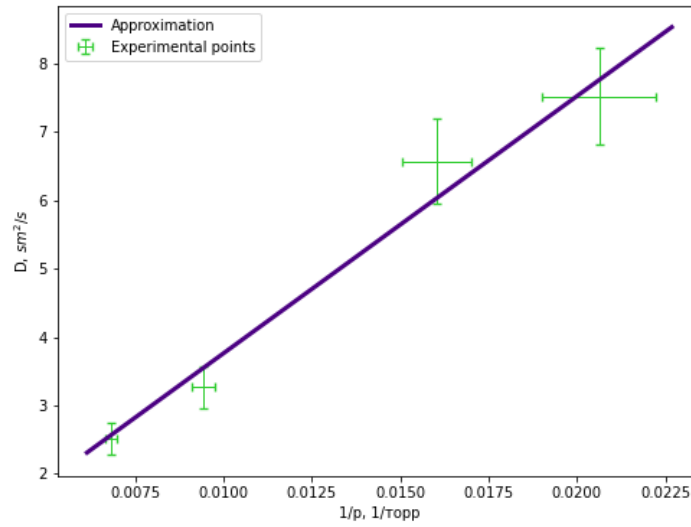


Рис. 9: Зависимость коэффициента взаимной диффузии от давления

Представим данные из таблице в виде графика зависимости D от $1/p$ (рис. 9)

Найдем угловой коэффициент наклона прямой на графике, рассчитаем значение D при атмосферном давлении:

$$k = 376.2 \pm 11.6 \text{см}^2/\text{с}/\text{торр} \quad (14)$$

Погрешность коэффициента взаимной диффузии при атмосферном давлении:

$$\sigma_{D(p_0)} = D(p_0) \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{p_0}}{p_0}\right)^2} \quad (15)$$

Вклад слагаемых в погрешность примерно одного порядка.

$$D(p_0) = k/p_0 = 0.51 \pm 0.02 \text{см}^2/\text{с} \quad (16)$$

Табличное значение $D(p_0) = 0.62 \text{ см}^2/\text{с}$, полученное значение близко к табличному.

Теперь рассмотрим диффузию примеси воздуха с гелием. Экспериментально получим зависимость напряжения на гальванометре (логарифмический масштаб) от времени, результат в виде графика (рис. 10)

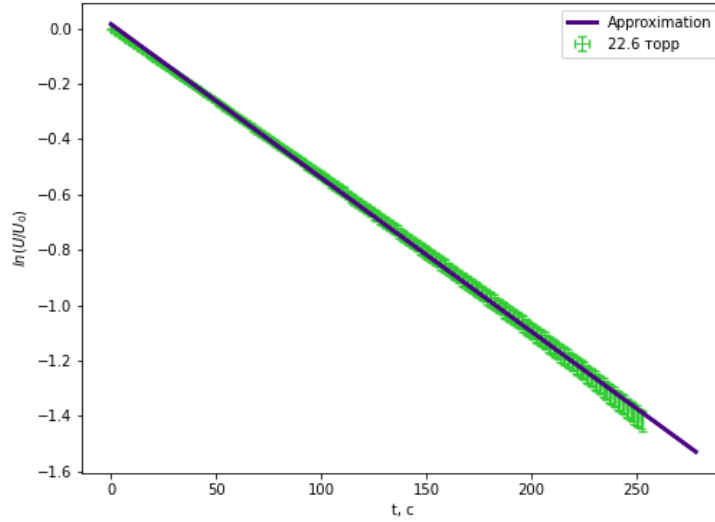


Рис. 10: Зависимость напряжения от времени при $p = 22.6$ торр

Посчитав угловой коэффициент (D), рассчитаем $D(p_0)$ исходя из этих экспериментальных данных:

$$\sigma_{D(p_0)} = D_{p_0} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_p}{p}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{p_0}}{p_0}\right)^2} \quad (17)$$

$$D(p_0) = D/p * p_0 = 0.55 \pm 0.09 \text{ см}^2/\text{с} \quad (18)$$

Можно заметить, что значения коэффициента взаимной диффузии данных газов при атмосферном давлении близки к друг другу, что свидетельствует о независимости коэффициента взаимной диффузии газов от начальных пропорций.

Посчитаем длину свободного пробега гелия в данных условиях:

$$\sigma_{\lambda_{He}} = \lambda_{He} \cdot \frac{\sigma_D}{D} \quad (19)$$

$$\lambda_{He} = \frac{3D}{\bar{v}} = \frac{3D}{\sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}} = (1.2 \pm 0.12) \cdot 10^{-7} \text{ м} \quad (20)$$

Из выражения для длины свободного пробега можно найти эффективное сечение столкновений атомов гелия с молекулами воздуха:

$$\sigma_\sigma = \sigma \sqrt{\left(\frac{\sigma_p}{p}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\lambda}{\lambda}\right)^2} \quad (21)$$

$$\sigma = \frac{1}{n_0 \lambda} = \frac{kT}{p \lambda} = (3.4 \pm 0.3) \cdot 10^{-19} \text{ м}^2 \quad (22)$$

Основной вклад в данную погрешность дает неточность измерения давления.

6 Вывод

Получено значение коэффициента взаимной диффузии гелия и воздуха при разных пропорциях, видна идентичность полученных результатов при разных пропорциях газов и при сравнении с табличными значениями.