

Лабораторная работа № 2.2.1
Исследование взаимной диффузии газов

1 Аннотация

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

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. В системе, состоящей из двух компонентов а и b (бинарная смесь), плотности потоков частиц в результате взаимной диффузии определяются 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. Знак «минус» отражает тот факт, что диффузия идёт в направлении выравнивания концентраций. Равновесие достигается при равномерном распределении вещества по объёму.

В данной работе исследуется взаимная диффузия гелия и воздуха. Отметим, что давление и температура в системе предполагаются неизменным: $P_0 = (n_{He} + n_v)kT = const$, где n_{He} и n_v — концентрации диффундирующих газов. Поэтому для любых изменений концентраций справедливо $\Delta n_v = -\Delta n_{He}$. Следовательно, достаточно ограничиться описанием диффузии одного из компонентов, например гелия.

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

$$D = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle, \quad (2)$$

где $\lambda = \frac{1}{n\sigma}$ — длина свободного пробега диффундирующих частиц; $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$ — их средняя тепловая скорость.

Предполагая, что процесс диффузии будет квазистационарным, можно показать, что разность концентраций будет убывать по экспоненциальному закону

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-t/\tau}, \quad (3)$$

где τ — характерное время выравнивания концентраций между сосудах, определяемое следующей формулой

$$\tau = \frac{1}{D} \frac{VL}{2S}. \quad (4)$$

3 Используемое оборудование

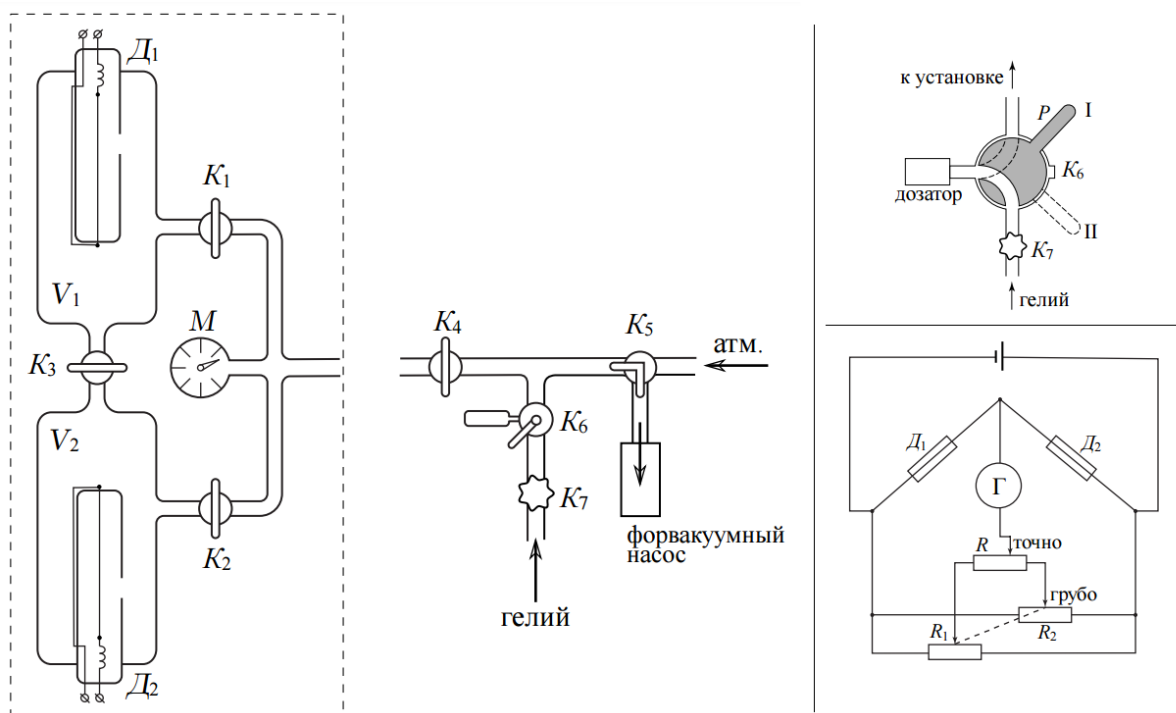


Рис. 1: Установка

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.

4 Результаты измерений и обработка данных

Параметры установки

$$V_1 \approx V_2 = 1200.0 \pm 3.0 \text{ см}^3 \quad (5)$$

$$L/S = 5.5 \pm 0.5 \text{ см}^{-1} \quad (6)$$

$$T = 295.0 \pm 1.0 \text{ K} \quad (7)$$

$$P = 745.70 \pm 0.10 \text{ торр} \quad (8)$$

Зависимость показаний вольтметра от времени

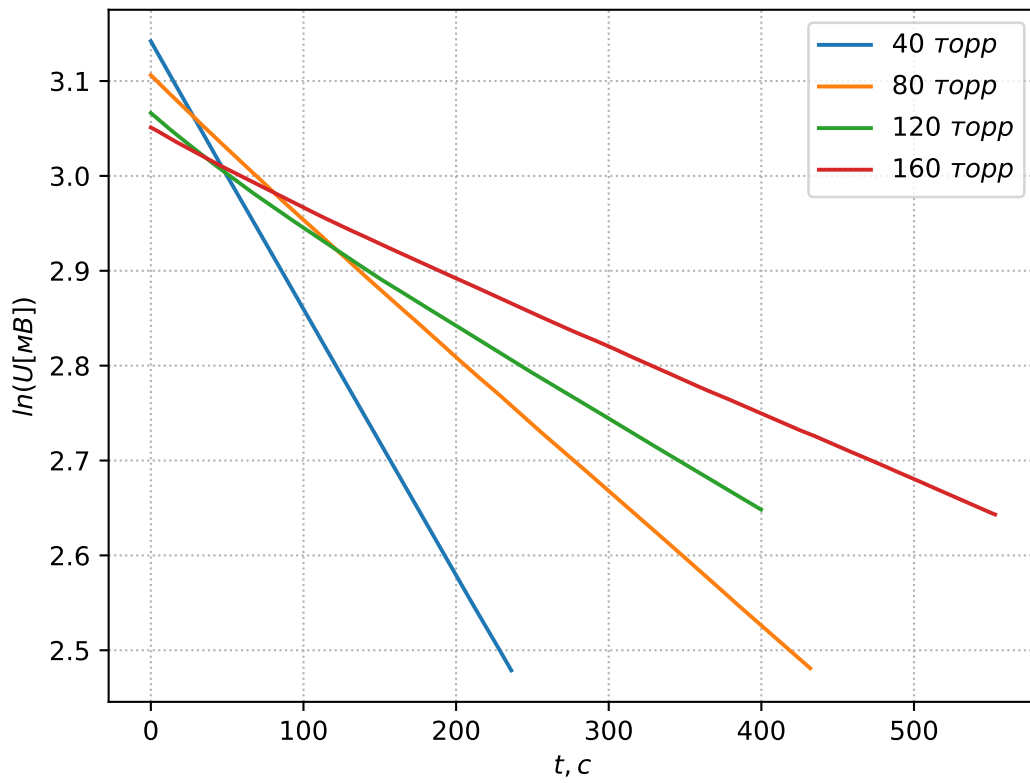


Рис. 2: Логарифмическая зависимость

Используя формулы (3) и (4), по угловым коэффициентам и известным геометрическим параметрам установки (5) и (6) рассчитаем коэффициенты взаимной диффузии при выбранных рабочих давлениях:

$D, \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	$P, \text{ торр}$
9.3 ± 0.8	40 ± 4
4.7 ± 0.4	80 ± 4
3.38 ± 0.31	120 ± 4
2.39 ± 0.22	160 ± 4

Таблица 1: Коэффициенты взаимной диффузии при выбранных рабочих давлениях

Коэффициент диффузии

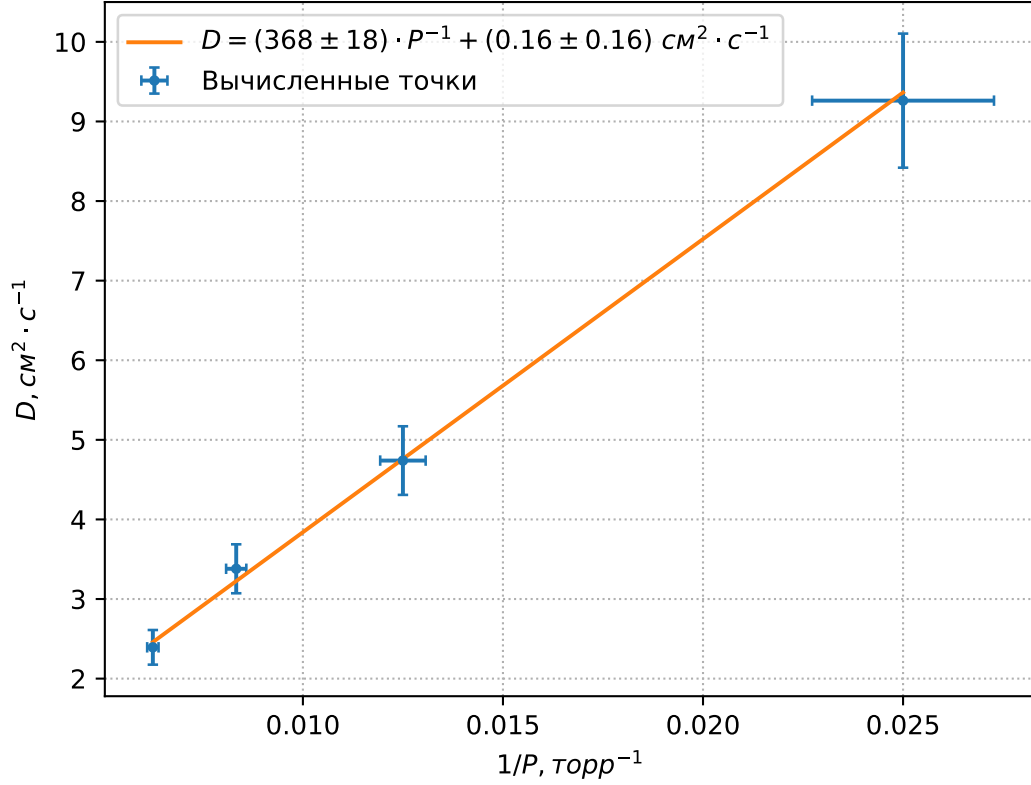


Рис. 3: Зависимость коэффициента диффузии от обратного давления

Экстраполируя график к атмосферному давлению (8):

$$D_{\text{He-в}}^{\text{атм}} = 0.65 \pm 0.16 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \quad (9)$$

Длина свободного пробега и эффективное сечение

Оценим длину свободного пробега атомов гелия в воздухе по формуле (2):

$$\lambda_{\text{He}}^{\text{атм}} = (1.6 \pm 0.4) \times 10^2 \text{ нм} \quad (10)$$

А также эффективное сечение столкновений атомов гелия с молекулами воздуха:

$$\sigma_{\text{He-в}}^{\text{атм}} = 0.26 \pm 0.07 \text{ нм}^2 \quad (11)$$

5 Обсуждение результатов

Из графика (рис. 2) видно, что процесс диффузии подчиняется закону (3).

Вычислен коэффициент диффузии при атмосферном давлении (9), значение которого хорошо согласуется с табличным:

$$D_{\text{He-в}}^{\text{табл}} = 0.620 \pm 0.010 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \quad (12)$$

Вычислены длина свободного пробега атомов гелия в воздухе (10), а также эффективное сечение столкновений атомов гелия с молекулами воздуха (11). Значение последнего хорошо согласуется с теоретически вычисленным по порядку:

$$\sigma_{\text{He-в}}^{\text{теор}} = \pi d_{\text{He}}^2 = 0.1385 \pm 0.0026 \text{ нм}^2 \quad (13)$$