

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа прикладной математики и информатики

Отчёт о выполнении лабораторной работы 2.2.1

Исследование взаимной диффузии газов

Автор:
Чикин Андрей Павлович
Б05-304

Долгопрудный, 2023

Содержание

1	Краткая Теория.	2
1.1	Методика измерений.	4
1.2	Экспериментальная установка.	4
2	Ход работы	4
2.1	Вывод.	7

Список иллюстраций

1	Установка.	3
---	--------------------	---

Список таблиц

1	Зависимость коэфф-ов взаимной диффузии воздуха и гелия при давлении Р (2.1).	7
---	--	---

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.

Приборы:

1. измерительная установка
2. форвакуумный насос
3. баллон с газом (гелием)
4. манометр
5. источник питания
6. магазин сопротивлений
7. гальванометр
8. секундомер

1 Краткая Теория.

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:

$$j_a = -D \frac{\partial n_a}{\partial x}, \quad j_b = -D \frac{\partial n_b}{\partial x} \quad (1.1)$$

D - коэффициент взаимной диффузии компонентов

$j_{a,b}$ - плотности потока, частиц, соответствующего сорта

$n_{a,b}$ - концентрации газов

В данной работе исследуется взаимная диффузия гелия и воздуха. Давление и температура в системе предполагаются неизменными.

$$n_{He} \ll n_{air}$$

Поэтому изменение концентрации воздуха в результате взаимной диффузии будет незначительной. В дальнейшем мы будем описывать только диффузию примеси гелия на стационарном фоне воздуха и под n будем иметь в виду концентрацию n_{He} .

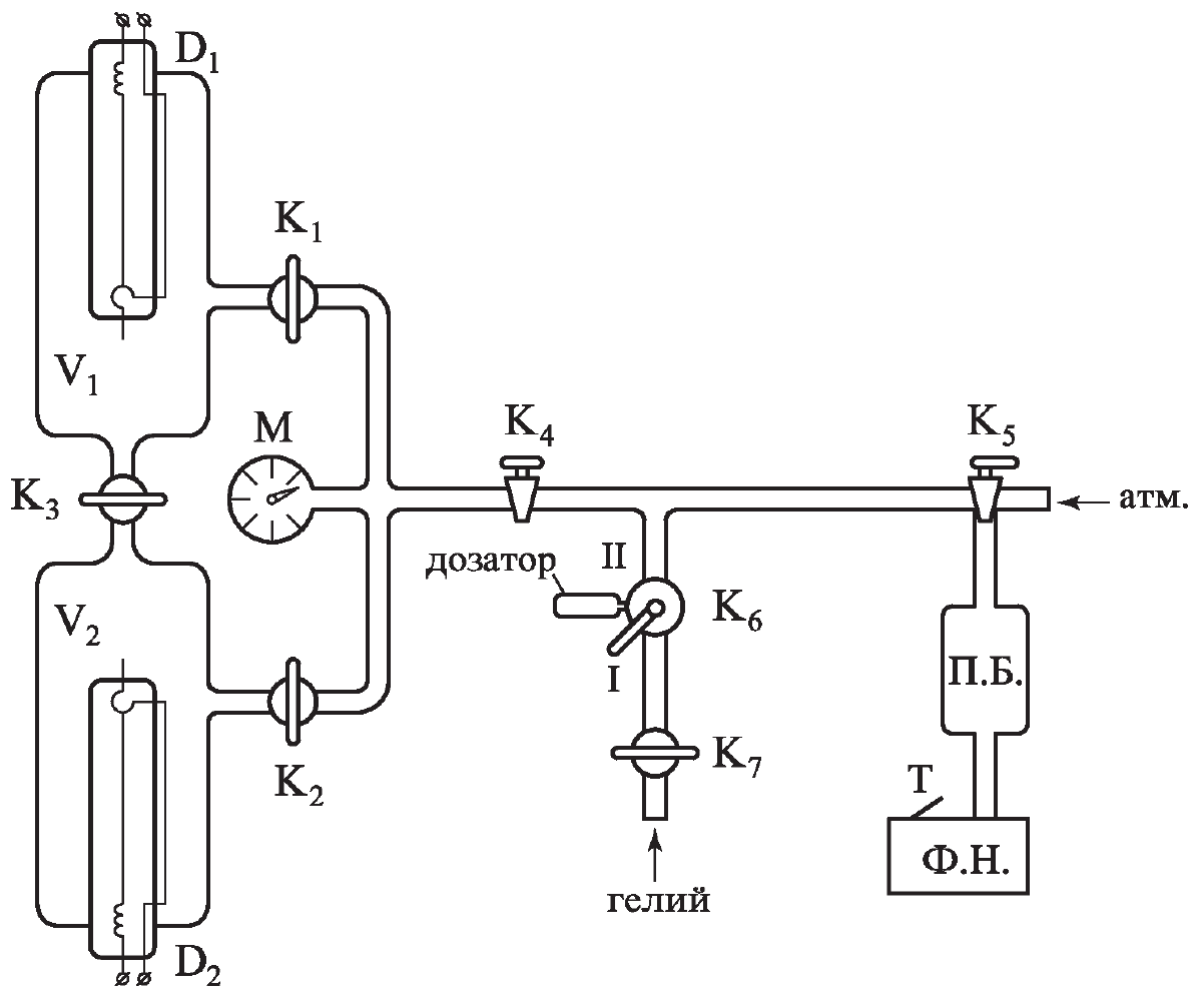


Рис. 1: Установка для исследования взаимной диффузии газов.

В работе используется установка, изображённая на рис. 1.

Два сосуда с объёмами 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 в обоих сосудах с течением времени выравниваются.

Рассмотрим процесс выравнивания концентрации. В трубке устанавливается стационарный поток частиц:

$$J = -DS \frac{\partial n}{\partial x} = -DS \frac{n_1 - n_2}{l} \quad (1.2)$$

Пусть Δn_1 и Δn_2 -изменения концентрации в V_1 и V_2 .

$$V_1 \Delta n_1 = -V_2 \Delta n_2 = J \Delta t = -DS \frac{n_1 - n_2}{l} \Delta t \quad \Rightarrow \quad (1.3)$$

$$V_1 \frac{dn_1}{dt} = -V_2 \frac{dn_2}{dt} = -DS \frac{n_1 - n_2}{l} \quad \Rightarrow \quad (1.4)$$

$$\frac{dn_1}{dt} - \frac{dn_2}{dt} = -DS \frac{n_1 - n_2}{l} \left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \right) \quad \Rightarrow \quad (1.5)$$

Пусть

$$\Delta n \triangleq n_1 - n_2$$

Тогда:

$$\Delta n = n_0 e^{-t/\tau} \quad (1.6)$$

n_0 - разность концентраций примеси в начальный момент времени

$$\tau = \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \frac{l}{SD} \quad (1.7)$$

Для проверки применимости квазистационарного приближения необходимо убедиться, что время τ много больше характерного времени диффузии:

$$t_{\text{дифф}} \approx \frac{l^2}{D} \ll \tau$$

1.1 Методика измерений.

Для измерения концентраций в данной установке применяются датчики теплопроводности D_1 и D_2 (см. рис. 1).

Тонкая проволока радиуса $r_{\text{пр}}$, протянутая вдоль оси стеклянного цилиндра радиуса $R_{\text{ц}}$, нагревается током.

$$Q = k \frac{2\pi L}{\ln R_{\text{ц}}/r_{\text{пр}}} (T_1 - T_2) \quad (1.8)$$

k - теплопроводность

$r_{\text{пр}}$ - радиус проволоки

$R_{\text{ц}}$ - радиус цилиндра

L - длина проволоки

T_1, T_2 - температура проволоки и стенки сосуда

Для измерения разности концентраций газов используется мостовая схема (см. рис. ??). Мост балансируется при заполнении сосудов одной и той же смесью.

При малых изменениях концентрации можно считать, что

$$V \sim k \sim n$$

Тогда:

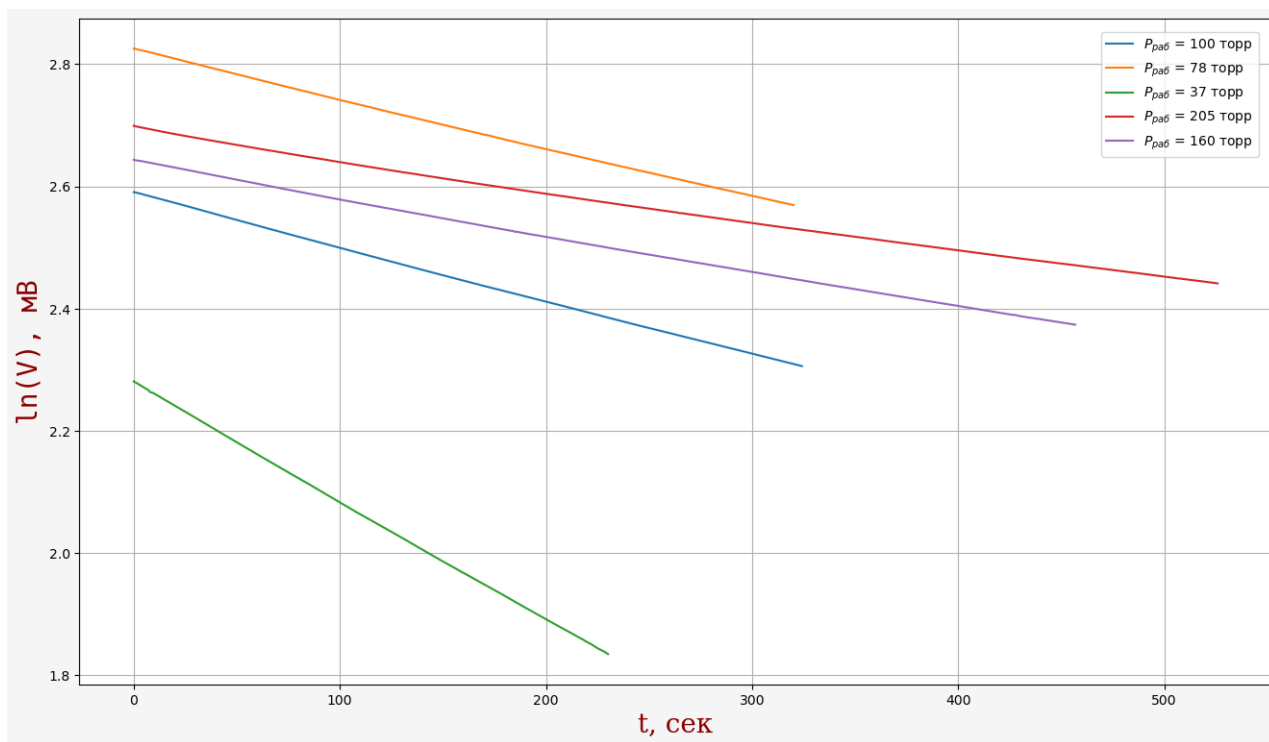
$$V = V_0 e^{-t/\tau} \quad (1.9)$$

1.2 Экспериментальная установка.

2 Ход работы

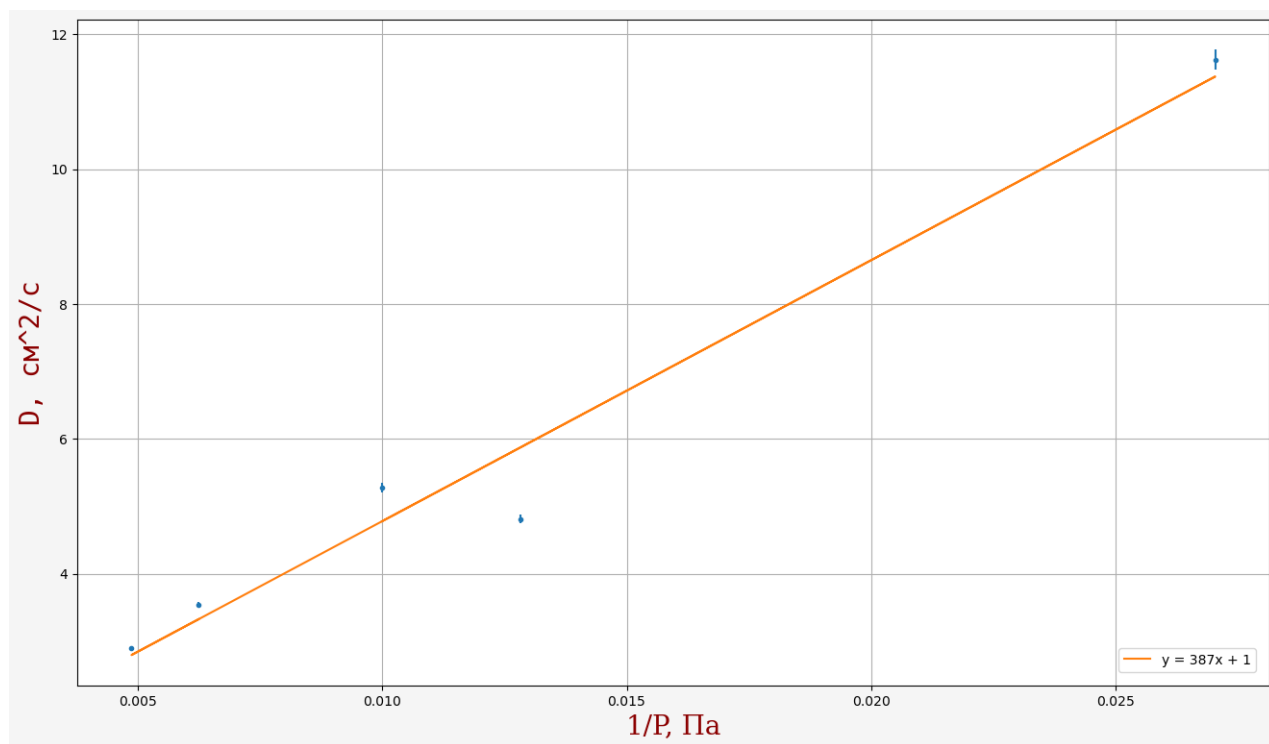
1. Ознакомимся с установкой.
2. Включим питание электрической схемы установки рубильником В.
Откроем краны K_1, K_2, K_3 .
3. Очистим установку от газов.
Для этого:
 - (a) Изолируем систему от атм. давления.
 - (b) Откроем кран K_4 .
 - (c) Включим насос.

- (d) Соединим насос с установкой краном K_5 .
 - (e) Откачаем установку до минимального значения на гальванометре.
(это занимает 1-5 мин.)
 - (f) Отключим насос.
 - (g) Перекроем K_4 .
 - (h) Соединим насос с атмосферой краном K_5 .
4. Запустим в установку воздух до рабочего давления $P_{\text{раб}}$
(вначале $P_{\text{раб}} \approx 40$ торр).
Конкретный метод зависит от установки.
Сбалансируем мост. Для этого добьемся примерно нулевого значения на гальванометре, поворачивая ручки "грубо" и "точно". Диапазон измерений гальванометра переведем на 10 мкА.
5. Заполним установку рабочей смесью. В сосуде V_2 должен быть воздух, а в сосуде V_1 — смесь воздуха с гелием. Для этого:
- (a) Откачаем установку.
 - (b) Закроем K_2 и K_3 (Изолируем V_2).
 - (c) Убедимся: K_5 закрыт, K_1 и K_4 открыты.
 - (d) Заполним V_1 гелием до $P_{\text{He}} = x \cdot P_{\text{раб}}$ (x зависит от установки).
Для этого будем постепенно запускать гелий в промежуток между K_6 и K_7 и из него в установку.
 - (e) Закроем K_1 (Изолируем V_1).
 - (f) Прочистим трубы от гелия. Для этого откачаем его насосом.
 - (g) Откроем K_2 (Соединим V_2).
 - (h) Заполним V_2 воздухом до давления $P_{\text{air}} = y \cdot P_{\text{раб}}$ (y зависит от установки).
 - (i) Закроем K_4 .
 - (j) Уравняем давление в объёмах V_1 и V_2 .
Для этого откроем K_1 и подождём 30-60 с.
 - (k) Закроем K_1 и K_2 .
6. Приступим к измерениям зависимости n_{He} от времени. Для этого запустим утилиту на компьютере и откроем K_3 .
7. Прделаем пункты 3-6 при 5-6 значениях $P_{\text{раб}}$ в интервале 40-400 торр.
8. Убедимся, что процесс диффузии подчиняется закону (1.6). Для этого построим графики $(t, \ln(n(t)))$ и по наклонам прямых рассчитать коэффициенты взаимной диффузии.
Данные представлены в виде зависимости $V(t)$, где V - показания гальвонометра.
Справедлива формула 1.9, поэтому достаточно воспользоваться зависимостью $V(t)$.



9. Построим график $(D, 1/P_{\text{раб}})$. График должен иметь вид прямой линии.
По формуле (1.9) Получим, что

$$\text{slope} = \frac{1}{\tau} \Rightarrow (1.7) \Rightarrow D = -\text{slope} \cdot \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \cdot \frac{L}{S} \quad (2.1)$$



P , Па	D , см ² /с	$slope$, Па · см ² /с
37	11.63 ± 0.15	$(-19377 \pm 13) \cdot 10^{-6}$
78	4.81 ± 0.06	$(-8017 \pm 9) \cdot 10^{-6}$
100	5.28 ± 0.07	$(-8799 \pm 8) \cdot 10^{-6}$
160	3.54 ± 0.05	$(-5893 \pm 9) \cdot 10^{-6}$
205	2.89 ± 0.04	$(-4816 \pm 11) \cdot 10^{-6}$

Таблица 1: Зависимость коэфф-ов взаимной диффузии воздуха и гелия при давлении P (2.1).

Рассчитаем величину коэффициента диффузии при атмосферном давлении.

По мнк получим коэффициенты прямой $y = \alpha x + \beta$:

$$\alpha = (387 \pm 40) \text{ Па} \cdot \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$$

$$\beta = (0.9 \pm 0.6) \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$$

$$D(P_{\text{атм}}) \approx \beta$$

10. Оценим по полученным результатам длину свободного пробега и размер молекулы.

По закону Менделеева-Клапейрона:

$$PV = \nu RT \implies n = \frac{PN_A}{RT} \quad (2.2)$$

Найдем концентрацию воздуха:

$$n_{\text{в}} = \frac{P_{\text{раб}} V_1}{RT} \approx P_{\text{раб}}. \quad (2.3)$$

2.1 Вывод.

В данной работе мы измерили зависимость изменения концентрации гелия в воздухе от времени при различных давлениях (рис. 8).

Определили коэффициенты взаимной диффузии (т. 1) и построили график $D(1/P)$ (см. рис. 9).