

# Лаборатория Работа 2.2.1

## Исследование взаимной диффузии газов

Сифат Мд Абдуллах Ал Хасиб

Физтех школа электроники, фотоники и молекулярной физики

Группа Б04-105

23 марта 2022 г.

### 1 Введение

**Цель работы:** 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 используется:** Измерительная установка; форвакуумный насос; баллон с газом (гелий); манометр; источник питания; магазин сопротивлений; гальванометр; секундомер.

### 2 Теоретическая справка

Диффузией называется самопроизвольное перемешивание молекул, происходящее вследствие их теплового движения. В жидкости диффузия происходит быстрее, чем в твердых телах, а в газах — быстрее, чем в жидкостях. В тех случаях, когда изучается перемешивание молекул одного сорта, говорят о самодиффузии, а если перемешиваются разные молекулы — о заимной (или концентрационной) диффузии.

Рассмотрим процесс выравнивания концентрации. Пусть концентрации одного из компонентов смеси в сосудах  $V_1$  и  $V_2$  равны  $n_1$  и  $n_2$ . 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. В наших условиях решение задачи упрощается благодаря тому, что: а) объем соединительной трубки мал по сравнению с объемами сосудов, б) концентрацию газов внутри каждого сосуда можно считать постоянной по всему объему. Диффузионный поток в любом сечении трубки одинаков. Поэтому  $J = -DS(\partial n / \partial x)$  не меняется вдоль трубки. Следовательно,

$$J = -DS \frac{n_1 - n_2}{l}.$$

Обозначим через  $\Delta n_1$  и  $\Delta n_2$  изменения концентрации в объемах  $V_1$  и  $V_2$  за время  $\Delta t$ . Тогда  $V_1 \Delta n_1$  равно изменению количества компонента в объеме  $V_1$ , а  $V_2 \Delta n_2$  — изменению

количества этого компонента в  $V_2$ . Из закона сохранения вещества следует, что  $V_1 n_1 + V_2 n_2 = \text{const}$ , откуда  $V_1 \Delta n_1 = -V_2 \Delta n_2$ . Эти изменения происходят вследствие диффузии, поэтому

$$V_1 \Delta n_1 = -V_2 \Delta n_2 = J \Delta t = -DS \frac{n_1 - n_2}{l} \Delta t.$$

Деля это равенство на  $\Delta t$ , получим

$$V_1 \frac{dn_1}{dt} = -DS \frac{n_1 - n_2}{l}, \quad V_2 \frac{dn_2}{dt} = DS \frac{n_1 - n_2}{l}.$$

Разделив первое из этих уравнений на  $V_1$ , а второе на  $V_2$  и вычтя эти равенства друг из друга, найдем

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

Введем новую переменную  $n_1 - n_2$ , после чего уравнение легко интегрируется:

$$n_1 - n_2 = (n_1 - n_2)_0 e^{-t/\tau}, \quad (1)$$

где  $(n_1 - n_2)_0$  — разность концентраций в начальный момент времени,

$$\tau = \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \frac{l}{SD} \quad (2)$$

Формула (1) показывает, что разность концентраций убывает по экспоненциальному закону, и тем быстрее, чем меньше  $\tau$  (постоянная времени процесса). Величина  $\tau$  определяется геометрическими размерами установки ( $l, S, V_1, V_2$ ) и величиной коэффициента диффузии  $D$ . 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  $r_{\text{пр}}$ , протянутая вдоль оси стеклянного цилиндра радиуса  $R_{\text{ц}}$ , нагревается током. Тепло от проволоки к стенке цилиндра переходит главным образом вследствие теплопроводности газа, находящегося внутри цилиндра. Количество тепла, передающееся стенке в единицу времени:

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

где  $\kappa$  — теплопроводность,  $L$  — длина нити,  $T_1, T_2$  — температуры проволоки и стенки. При заданном режиме нагревания ( $Q = \text{const}$ ) температура проволоки и соответственно ее сопротивление определяются теплопроводностью газа и, следовательно, его составом. В процессе диффузии разность концентраций убывает по закону (1). Потому же закону изменяются во времени показания гальванометра (например, в делениях шкалы), т. е.

$$N = N_0 e^{-t/\tau},$$

где  $N_0$  — показание в начальный момент времени.

### 3 Экспериментальная установка

Схема установки изображена на рис. 1. Там же показана схема электрических соединений и конструкция многоходового крана  $K_6$ . Установка состоит из двух сосудов  $V_1$  и  $V_2$

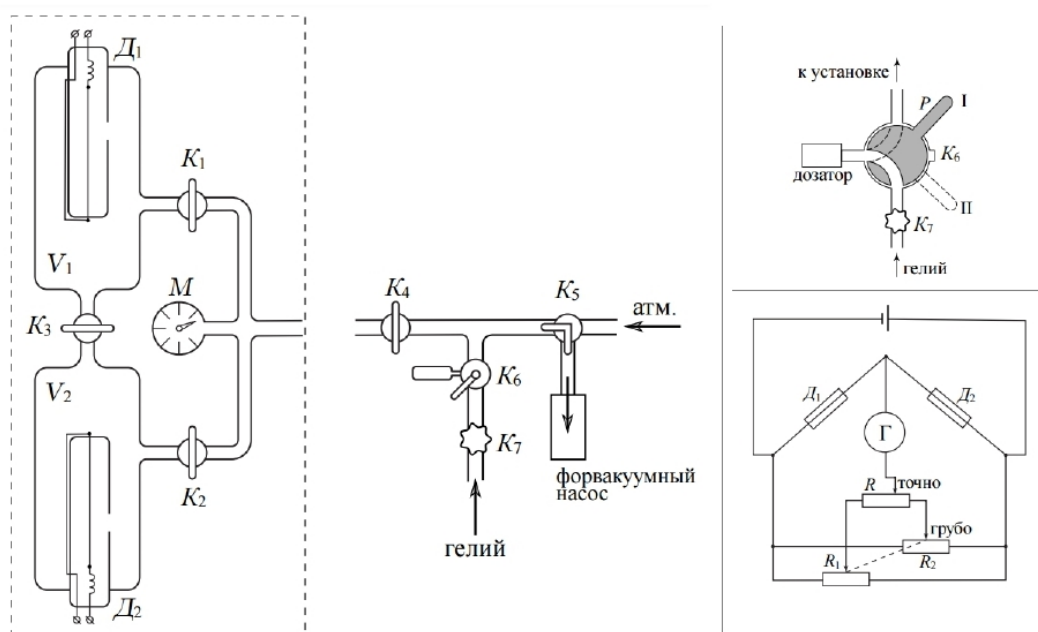


Рис. 1: схема установки

соединенных краном 3, форвакуумного насоса Ф.Н. с выключателем, манометра  $M$  и системы напуска гелия, включающей в себя краны 6 и 7. Кран 5 позволяет соединять форвакуумный насос либо с установкой, либо с атмосферой. Между форвакуумным насосом и краном 5 вставлен предохранительный баллон П.Б., защищающий кран 5 и установку при неправильной эксплуатации ее от попадания форвакуумного масла из насоса Ф.Н. Сосуды  $V_1$  и  $V_2$  и порознь и вместе можно соединять как с системой напуска гелия, так и с форвакуумным насосом. Для этого служат краны 1, 2, 4 и 5. Манометр  $M$  регистрирует давление газа, до которого заполняют тот или другой сосуды.

Для сохранения гелия, а также для уменьшения неконтролируемого попадания гелия в установку (по протечкам в кране 6) между трубопроводом подачи гелия и краном 6 поставлен металлический кран 7. Его открывают только на время непосредственного заполнения установки гелием. Все остальное время он закрыт.

В силу того, что в сосуд требуется подавать малое давление гелия, между кранами 7 и 4 стоит кран 6, снабженный дозатором. Дозатор - это маленький объем, который заполняют до давления гелия в трубопроводе, а затем уже эту порцию гелия с помощью крана 6 впускают в установку.

Описание схемы электрического соединения. 1 и 2 — сопротивления проволок датчиков парциального давления, которые составляют одно плечо моста. Второе плечо моста составляют сопротивления  $r_1$ ,  $R_1$  и  $r_2$ ,  $R_2$ .  $r_1 \ll R_1$ ,  $r_2 \ll R_2$ ,  $R_1$  и  $R_2$  спаренные, их подвижные контакты находятся на общей оси. Оба они используются для грубой регулировки моста. Точная балансировка моста выполняется потенциометром  $R$ . Последовательно с гальванометром, стоящим в диагонали моста, поставлен магазин сопротивлений  $MR$ . Когда мост балансируют, магазин сопротивлений выводят на ноль. В процессе же

составления рабочей смеси в сосудах  $V_1$  и  $V_2$  мост разбалансирован. Чтобы не сжечь при этом гальванометр, магазин  $MR$  ставят на максимальное сопротивление.

## 4 Ход работы

Геометрические параметры установки:

$V_1, \text{см}^3$ ,	$V_2, \text{см}^3$	$L/S, 1/\text{см}$	$P_{\text{гел}}$	$P_{\text{воз}}$
$775 \pm 10$	$775 \pm 10$	$5.3 \pm 0.1$	$0.2P_{\text{раб}}$	$1.675P_{\text{раб}}$

Для каждого из давлений построим графики, откладывая по оси абсцисс время, а по оси ординат — логарифм от показаний гальванометра и найдём угловые коэффициенты каждой прямой:

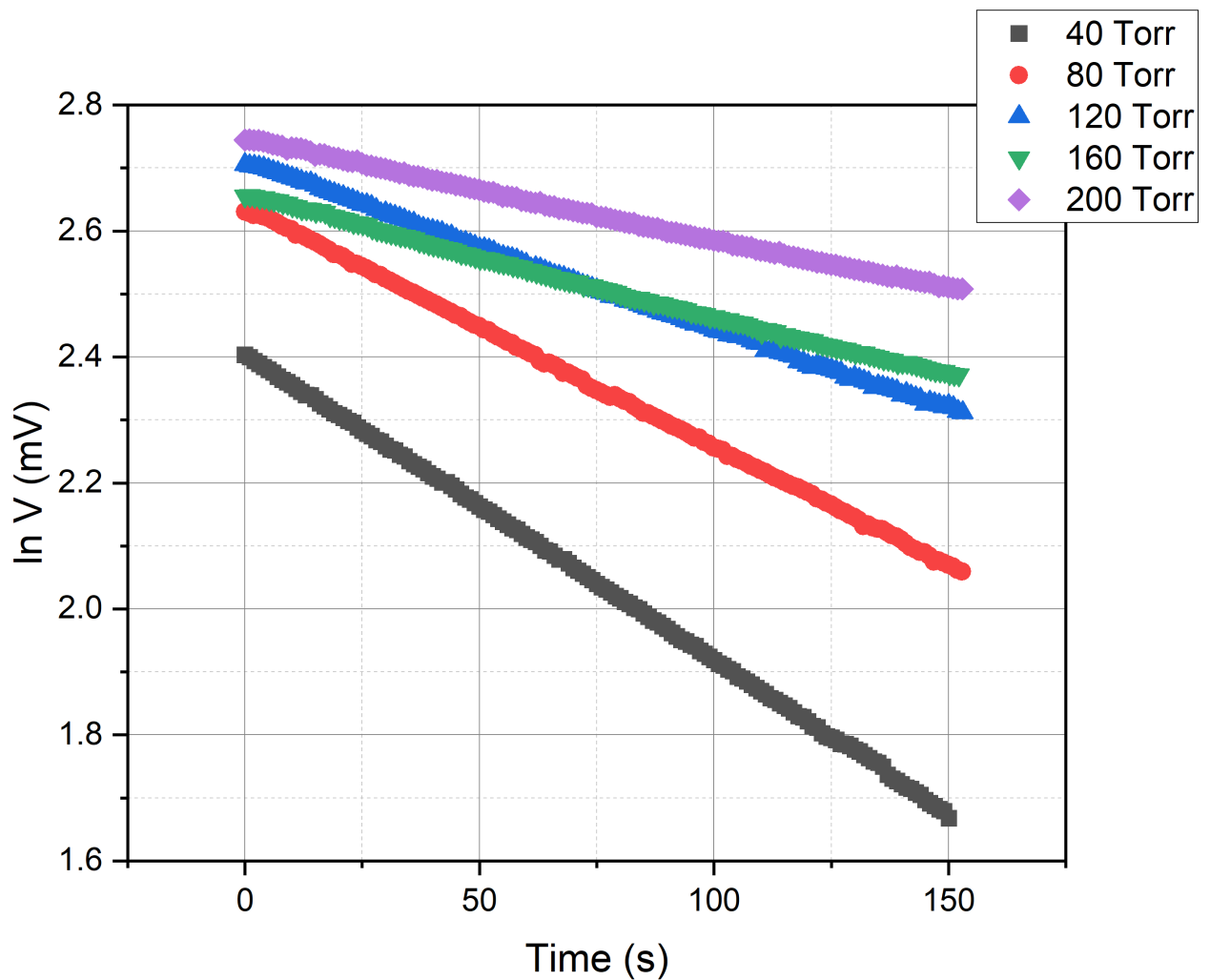


Рис. 2: графики зависимости  $\ln V(t)$

Угловые коэффициенты графиков:

$1/\tau_1, 10^{-3}1/c$	$1/\tau_2, 10^{-3}1/c$	$1/\tau_3, 10^{-3}1/c$	$1/\tau_4, 10^{-3}1/c$	$1/\tau_5, 10^{-3}1/c$
$4.87 \pm 0.05$	$3.79 \pm 0.03$	$2.63 \pm 0.03$	$1.91 \pm 0.02$	$1.59 \pm 0.3$

Найдём коэффициенты взаимной диффузии газов при выбранных давлениях из формулы (2):

$$D = \frac{L}{S} \cdot \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \cdot \frac{1}{\tau}$$

$D_1, \frac{\text{cm}^2}{\text{с}}$	$D_2, \frac{\text{cm}^2}{\text{с}}$	$D_3, \frac{\text{cm}^2}{\text{с}}$	$D_4, \frac{\text{cm}^2}{\text{с}}$	$D_5, \frac{\text{cm}^2}{\text{с}}$
$11.13 \pm 0.5$	$8.66 \pm 0.5$	$5.99 \pm 0.5$	$4.51 \pm 0.5$	$3.64 \pm 0.5$

Построим график зависимости  $D(\frac{1}{P})$  и по его коэффициенту наклона рассчитаем величину коэффициента диффузии при атмосферном давлении:

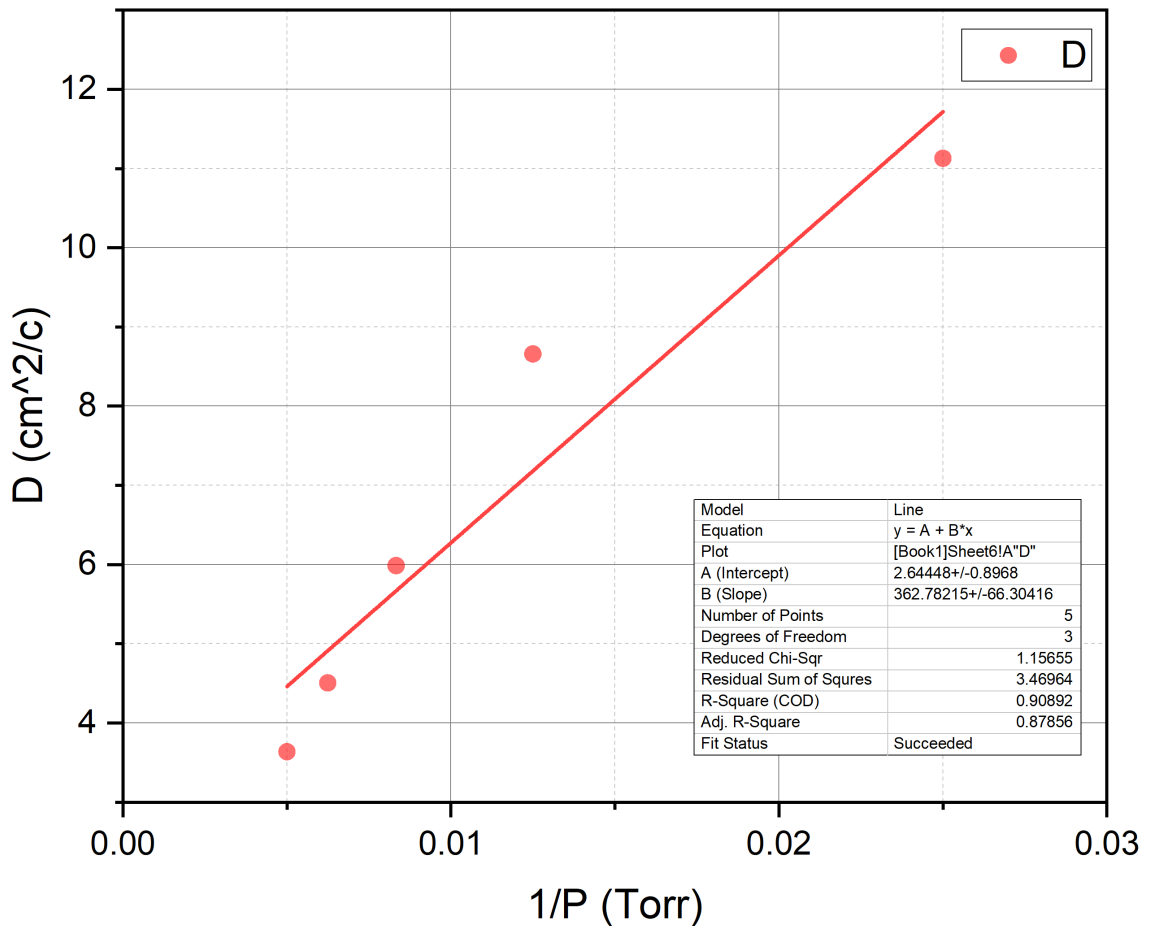


Рис. 3: График зависимости  $D(\frac{1}{P})$

Проведём аппроксимацию полученной зависимости прямыми  $y = kx + b$  методом Йорка, который учитывает погрешность  $\sigma_{1/P}$ , при помощи программы OriginPro 2022. В итоге получаем

$$k = (362, 78 \pm 25, 8) \frac{\text{cm}^2}{\text{с} \cdot \text{торр}}.$$

Таким образом, для атмосферного давления в экспериментальной дате ( $P = 752$  торр) получаем

$$D_{\text{атм}} = (0,48 \pm 0,05) \frac{\text{см}^2}{\text{с}},$$

## 5 Вывод

В итоге, для коэффициента взаимной диффузии смеси гелий-воздух мы получили:

$$D_{\text{атм}} = (0,48 \pm 0,03) \frac{\text{см}^2}{\text{с}}, \quad (\varepsilon = 8.3\%).$$

Сравним полученные данные с табличными. Из таблицы в «Лабораторном практикуме» имеем:

$$D_{\text{табл}} = 0,58 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}.$$

Таким образом, полученные экспериментально данные отличаются от табличных и не совпадают в пределах погрешности. Однако, полученные результаты совпадают с табличным значением по порядку величины, что может говорить об их качественной достоверности. Полученное экспериментально значение позволяет качественно описать процесс взаимной диффузии смеси воздух-гелий, а отклонение от табличного значения могло возникнуть из-за неидеальных условий проведения эксперимента. Так, не удавалось точно добиться необходимого начального давления, тем самым нарушалась балансировка моста и измерения могли исказиться.

Также были оценены длина свободного пробега гелия в воздухе и сечение столкновения его атомов с молекулами воздуха. Мы получили:

$$\lambda = (107,3 \pm 7,5) \text{ нм}, \quad (\varepsilon = 7\%),$$

$$\sigma \approx (3,51 \pm 0,24) \cdot 10^{-19} \text{ м}^2, \quad (\varepsilon = 7\%).$$

Сравним полученные данные с табличными. Из справочников имеем:

$$\lambda_{\text{табл}} = 175 \text{ нм},$$

$$\sigma_{\text{табл}} = 5,89 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2.$$

Таким образом, наша оценка по порядку величины совпадает с табличными данными.