

# Лабораторная работа 2.2.1

## Исследование взаимной диффузии газов

Рашковецкий М.М., группа 526т

25 мая 2016 г.

**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.

**Оборудование и материалы:** измерительная установка; форвакуумный насос; баллон с гелием; манометр; источник питания; магазин сопротивлений; гальванометр; секундомер.

### Краткая теория

Диффузия — самопроизвольное перемешивание молекул вследствие их хаотичного теплового движения. При перемешивании молекул разного сорта говорят о взаимной (концентрационной) диффузии. Для наблюдения диффузии требуется равенство давлений в системе, иначе возникнет просто течение газа как целого.

В системе из двух компонентов плотность потока обоих веществ определяется законом Фика:

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

где  $D_{ab} = D_{ba} = D$  — коэффициент взаимной диффузии компонентов,  $j_{a,b}$  — соотв. плотности потоков.

В работе исследуется диффузия примеси гелия на фоне воздуха, изменением концентрации воздуха мы пренебрегаем и впредь, если не оговорено обратного, под  $n$  будем понимать концентрацию гелия.

В работе используются два сосуда с объёмами  $V_1$  и  $V_2$ , соединённые трубкой длины  $l$  и сечения  $S$ . Обозначим концентрации гелия в них  $n_1$  и  $n_2$  соотв. Если процесс выравнивания концентраций происходит достаточно медленно, то поток частиц через все сечения трубки одинаков, поэтому градиент концентраций вдоль ней равномерный и поток равенство

$$J = -DS \frac{n_1 - n_2}{l}. \quad (2)$$

Для изменений концентраций справедливо

$$V_1 dn_1 = -V_2 dn_2 = J dt = -DS \frac{n_1 - n_2}{l} dt. \quad (3)$$

Разделим на  $dt$ :

$$V_1 \frac{dn_1}{dt} = -DS \frac{n_1 - n_2}{l} dt, V_2 \frac{dn_2}{dt} = DS \frac{n_1 - n_2}{l} dt. \quad (4)$$

Разделим на  $V_{1,2}$  и вычтем одно из другого, тогда

$$\frac{dn_1 - dn_2}{dt} = -DS \frac{n_1 - n_2}{l} \left( \frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \right). \quad (5)$$

Для разности концентраций  $\Delta n = n_1 - n_2$ , тогда уравнение легко интегрируется:

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-t/\tau}, \quad (6)$$

где

$$\tau = \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \frac{l}{SD}. \quad (7)$$

Квазистационарное приближение применимо, если время  $\tau$  много больше характерного времени диффузии частицы вдоль трубки:

$$t_{\text{диф}} \sim \frac{l^2}{D} \ll \tau. \quad (8)$$

Для измерений концентраций используются датчики теплопроводности, состоящие из тонкой проволоки радиусом  $r_{\text{пр}}$ , нагреваемой током и протянутой вдоль оси стеклянного цилиндра радиусом  $R_{\text{ц}}$ . Тепло от проволоки к цилиндру передаётся в основном за счёт теплопроводности, мощность передачи равна

$$Q = \kappa \frac{2\pi L}{\ln(R_{\text{ц}}/r_{\text{пр}})} (T_1 - T_2), \quad (9)$$

где  $\kappa$  — теплопроводность,  $L$  — длина нити,  $T_1, T_2$  — температуры проволоочки и стенки. При заданном режиме нагревания температура и соотв. сопротивление проволоки определяется теплопроводностью газа, зависящей от его состава.

Для измерения разности концентраций используется мостовая схема. Мост балансируется при помощи сопротивлений при нулевой разности концентраций, при другой разности возникает разбалансировка моста, зависящая от  $\Delta n$ .

Вообще зависимость теплопроводности от состава смеси газов сложна, но в первом приближении можно ожидать линейность, что подтверждается экспериментально: при разности концентраций 15% поправка к линейности всего 0,5%, чего нам хватит.

Тогда с достаточной точностью показания приборов будут меняться по формуле, аналогичной (6):

$$N = N_0 e^{-t/\tau}. \quad (10)$$

Некоторые особенности методики.

1. Для устранения конвекции датчик выполнен в форме длинной стеклянной трубки с платиновой нитью. Внутренняя часть датчика сообщается с сосудом отверстием такого размера, что скорость диффузии между сосудами намного меньше, чем между сосудом и датчиком. Т.о., состав газа в датчике почти совпадает с составом в сосуде.
2. В силу неполного обмена энергией между молекулами газа и проволокой возле её поверхности возникает температурный скачок, из-за этого, а также из-за того, что датчики немного разные, баланс немного зависит от давления. Поэтому рекомендуется балансировать мост при каждом давлении в чистом воздухе.

# Установка

Рис. 1: Схема установки

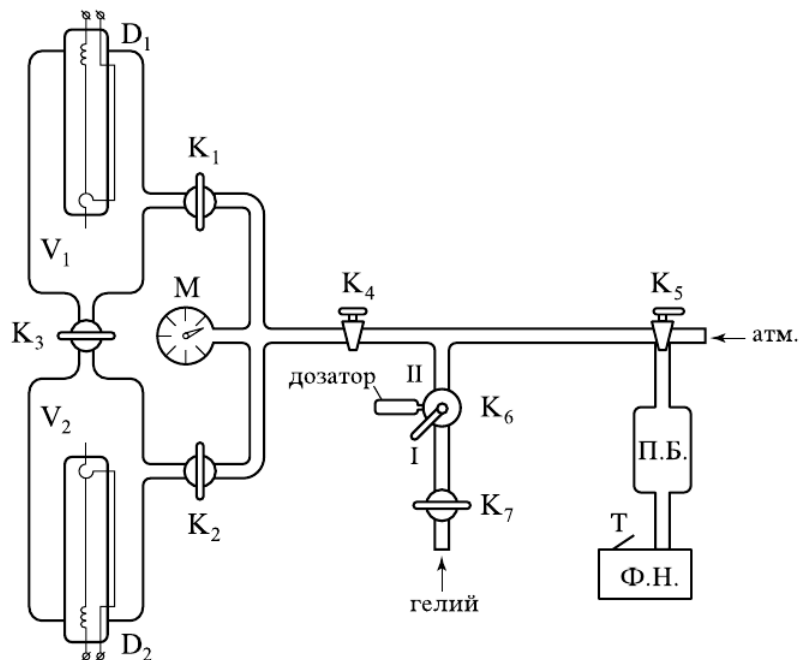
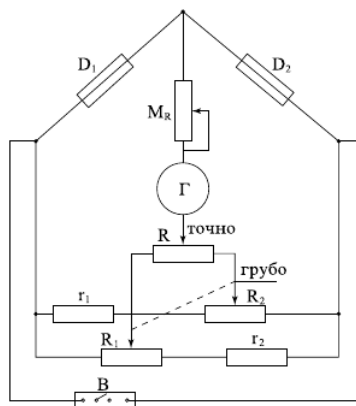


Схема установки изображена на рис. 1. Она состоит из двух сосудов  $V_1$  и  $V_2$ , соединённых краном  $K_3$ , форвакуумного насоса Ф.Н. с выключателем Т, манометра М и системы напуска гелия, включающей краны  $K_6$  и  $K_7$ . Кран  $K_5$  позволяет соединять насос с установкой или атмосферой, предохранительный баллон П.Б. защищает этот кран и установку от попадания масла из насоса при неправильной эксплуатации.

На рис. 2 приведена схема электрических соединений.

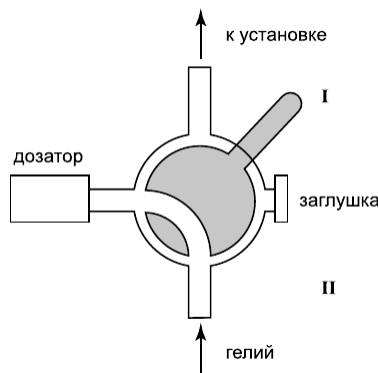
Рис. 2: Мостовая схема с датчиками теплопроводности



В трубопроводе давление гелия больше атмосферного. Это нужно, чтобы несмотря на утечки, гелий оставался там без примесей воздуха. Система напуска гелия обычно имеет утечки, поэтому для его сохранения и предотвращения протекания гелия в установку кран  $K_7$  обычно закрыт.

Устройство крана  $K_6$  показано на рис. 3. Когда рычажок находится в положении I, дозатор (малый объём) наполняется до давления гелия в трубопроводе, затем рычажок переводится в положение II и гелий из дозатора перетекает в установку. Эту процедуру следует повторять, пока не создастся требуемое давление гелия.

Рис. 3: Кран  $K_6$



## Ход работы

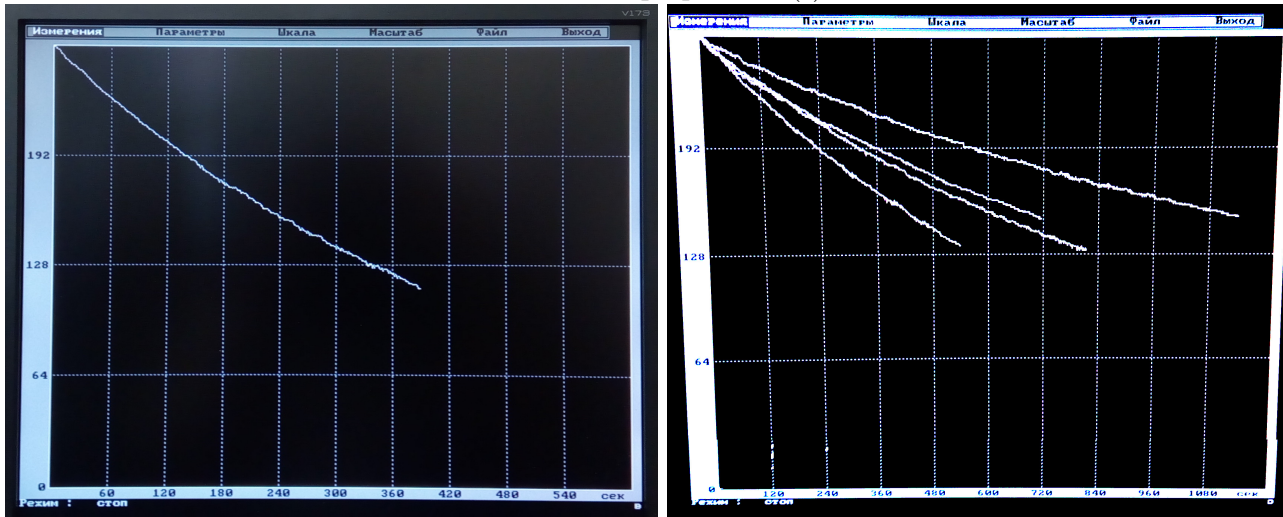
1. Записал параметры установки:  $V_1 = (800 \pm 5) \text{ см}^3$ ,  $V_2 = (800 \pm 0,5) \text{ см}^3$ ,  $L/S = (11 \pm 1) \text{ см}^{-1}$ .
2. Включил питание электрической схемы, включил компьютер, открыл краны  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ .
3. С помощью форвакуумного насоса очистил установку от всех газов, откачав её до давления  $\sim 0,1$  торр.
4. Напустил воздух до рабочего давления, сбалансировал мост.
5. Заполнил установку рабочей смесью (в  $V_1$  — смесь воздуха и гелия, в  $V_2$  — воздух):
  - (a) Откачал установку.
  - (b) Изолировал  $V_2$ .
  - (c) Заполнил  $V_1$  гелием до  $0,2P_{\text{рабочее}}$ .
  - (d) Изолировал  $V_1$ .
  - (e) Откачал гелий из патрубков форвакуумным насосом.
  - (f) Соединил с остальной установкой  $V_2$ .
  - (g) Наполнил  $V_2$  воздухом до  $1,5P_{\text{рабочее}}$ .
  - (h) Закрыл  $K_4$ .

- (i) Открыл  $K_2$  на 20 с, затем закрыл  $K_1$ ,  $K_2$ .
6. Открыл  $K_3$  и запустил измерения на компьютере.
7. Подождал, пока показания уменьшатся в 1,5–2 раза, остановил запись точек.
8. Повторил процедуру (п.п. 3–7) для других рабочих давлений.

## Обработка результатов

Результаты измерений приведены на графиках, построенных на компьютере (рис. 4). На левом график для 40 торр, на правом – для остальных давлений (80, 120, 160, 250 торр), чем выше график, тем больше давление.

Рис. 4: Графики  $N(t)$



К сожалению, после снятия измерений для 40 торр компьютер завис, так что логарифмического графика не сохранилось. Остальные приведены на рис. 5, чем выше график, тем ниже давление.

На компьютере по введенным параметрам установки были рассчитаны коэффициенты диффузии и их погрешности для всех температур, они приведены в таблице 1

Таблица 1: Коэффициенты диффузии для разных давлений

$P$ , торр	$D$ , $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	$\sigma_D/D$	$\sigma_D$ , $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$
40	9,1	0,098	0,9
80	5,3	0,098	0,5
120	3,7	0,104	0,4
160	3,2	0,133	0,4
250	2,0	0,125	0,3

Затем я построил график  $D(1/P)$  (рис. 6).

Рис. 5: Графики  $N(t)$  в логарифмическом масштабе

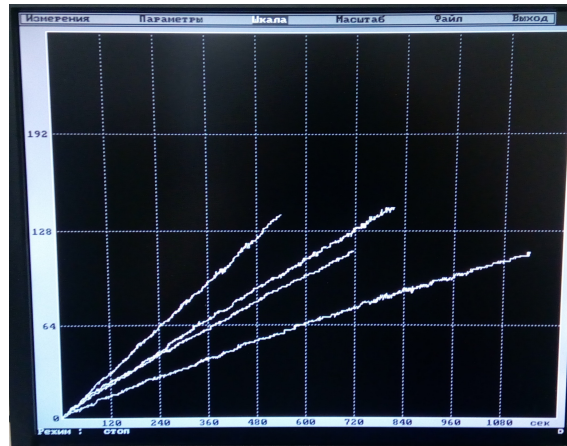
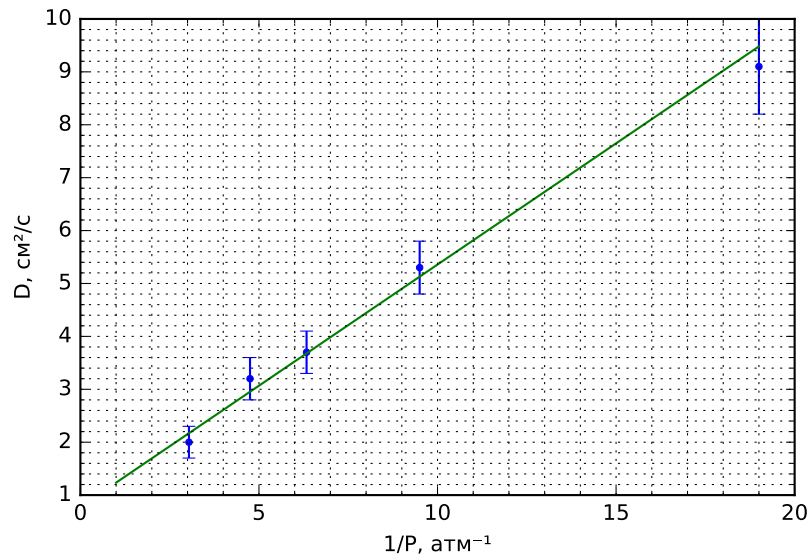


Рис. 6: График  $D(1/P)$



Я линейно аппроксимировал его как  $D = D_0 + K/P$  и получил следующие значения:

$$D_0 = (0,8 \pm 0,2) \frac{\text{см}^2}{\text{с}},$$

$$K = (0,46 \pm 0,03) \frac{\text{см}^2 \cdot \text{атм}}{\text{с}}.$$

По этим коэффициентам я нашёл коэффициент диффузии при атмосферном давлении:

$$D_{\text{атм}} = (1,2 \pm 0,2) \frac{\text{см}^2}{\text{с}}.$$

Табличное значение из лабника для воздуха и гелия при  $0^\circ\text{C}$ :  $D = 0,62 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$ . Оно отличается от полученного в два раза, причина, скорее всего, в том, что они при разных температурах.

Оценим длину свободного пробега и размер молекулы, считая, что взаимная диффузия обеспечивается в основном гелием. По формуле для коэффициента диффузии

$$D = \frac{1}{3} \bar{v} \lambda. \quad (11)$$

Как известно, средняя скорость

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} \quad (12)$$

В свою очередь, длина свободного пробега определяется из условия

$$\pi n d^2 \lambda = 1, \quad (13)$$

при этом

$$P = nkT. \quad (14)$$

Результаты оценок приведены в таблице 2

Таблица 2: Длина свободного пробега и размер молекулы для разных давлений

$P$ , торр	$\lambda$ , мкм	$d$ , Å
40	2	3
80	1	3
120	0,9	3
160	0,7	3
250	0,5	3
760	0,3	2