

Лабораторная работа №2.2.1

Исследование взаимной диффузии газов.

Каграманян Артемий, группа Б01-208

28 апреля 2023 г.

1 Аннотация

Цель работы: Зарегистрировать зависимость концентрации гелия в воздухе от времени с помощью датчиков теплопроводности при разных начальных давлениях смеси газов и измерить коэффициент взаимной диффузии по результатам измерений.

Оборудование: Измерительная установка (см. рис.), форвакуумный насос, баллон с газом, манометр, источник питания, магазин сопротивлений, гальванометр, секундомер

2 Теоритическая справка

Диффузией называется самопроизвольное перемешивание молекул из-за их хаотичного теплового движения. В нашей системе давления во всех точках равны, так как иначе будет слишком сильное перемещение газов из одной точки в другую до того момента, пока не установится равенство.

Наша система состоит из двух сред, обозначим их за a и b . Плотности потоков в этом случае будут равны:

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

где, $D_{ab} = D_{ba} = D$ - коэффициент взаимной диффузии

В нашем случае концентрация воздуха намного больше, чем концентрация гелия (так как мы рассматриваем диффузию примеси гелия). Обозначим n_{He} за n . Поэтому мы будем рассматривать только диффузию гелия на стационарном фоне воздуха.

В нашей установке есть два сосуда объемами V_1 и V_2 , соединенные трубкой сечения S и длины l . В начальный момент концентрации гелия в этих сосудах не равны, но в конце диффузии они выравниваются. Сечение трубки много меньше размеров сосудов, поэтому можно говорить, что концентрация гелия в сосудах одинакова в любой точке, а процесс выравнивания концентраций осуществляется только благодаря диффузии в трубке.

Предположим, что процесс диффузии - достаточно медленный процесс, чтобы концентрация в сосудах изменялась линейно, и поток через трубку можно измерить по формуле (квазистационарное приближение):

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

Найдем, как изменяются n_1 и n_2 от времени. По закону сохранения вещества:

$$V_1 n_1 + V_2 n_2 = const \Rightarrow V_1 dn_1 = -V_2 dn_2 = J dt = -DS \frac{n_1 - n_2}{l} dt$$

$$\frac{dn_1}{dt} = -DS \frac{n_1 - n_2}{lV_1}, \frac{dn_2}{dt} = DS \frac{n_1 - n_2}{lV_2}$$

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

Сделав замену $d(\Delta n) = d(n_1 - n_2)$ и проинтегрировав получившееся, получим следующее:

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad \tau = \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \frac{l}{SD}$$

Для проверки квазистационального приближения нужно убедиться, что время характерной диффузии одной частицы много меньше, чем τ : $t_d \sim \frac{l^2}{D} \ll \tau$.

Для измерения концентрации гелия в сосуде используются датчики теплопроводности смеси. Они работают следующим образом: В сосуде расположена проволока, по которой мы пускаем ток. Проволока нагревается, а смесь проводит тепло от проволоки к стенкам сосуда. Таким образом, тепло, которое передалось стенке за единицу времени, составляет:

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

где κ - теплопроводность смеси, L - длина проволоки, T_1 и T_2 - температуры проволоки и стенки сосуда.

Для измерения разности концентраций гелия в сосудах используется мостовая схема, в которой есть гальванометр. В нашей работе он показывал напряжение на нем. При достаточно малых изменениях концентраций величина тока, проходящего через него, пропорциональна разности концентраций. В таком случае, показания гальвонометра:

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

Также следует отметить, что коэффициент диффузии можно оценить следующим образом:

$$D = \frac{1}{3} v_{\text{тепл}} \lambda, \quad \lambda = \frac{1}{n_0 \sigma},$$

где λ - длина свободного пробега частицы, n_0 - концентрация фона, σ - эффективное сечение столкновений.

3 Экспериментальная установка

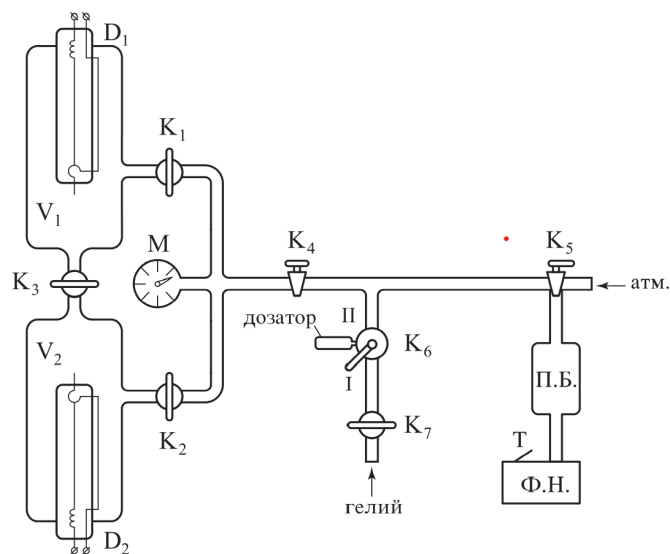


Рис. 1: схема установки

Установка состоит из двух сосудов объемами V_1 и V_2 , в которых находятся датчики теплоемкости. Эти сосуды соединены с атмосферой, насосом и гелием с помощью стеклянных трубочек. Также здесь присутствует дозатор, который впускает в систему гелий определенными порциями. В момент, когда мы открываем K_3 и начинается диффузия, на компьютере отмечаются показания гальванометра в виде графика.

4 Выполнение работы

В начале каждого измерения нужно откалибровать мост под каждое рабочее давление. Для этого нужно запустить в сосуды воздух до требуемого рабочего давления, предварительно откачав перед этим систему, и подкрутить мост, чтобы вольтметр показывал примерно 0 мВ. Затем в один из сосудов впускаем гелий до давления $0.2 P_{\text{раб}}$, а во второй сосуд - воздух до давления $1.635 P_{\text{раб}}$ (это при закрытом K_3). Далее мы отделяем от системы эти два сосуда и соединяем их между собой, ждем 15 секунд, чтобы в них установилось одинаковое давление, открываем K_3 и начинаем снимать показания вольтметра.

Мы проведем 5 измерений для разных рабочих давлений, а именно для 40, 60, 80, 100, 120 торр.

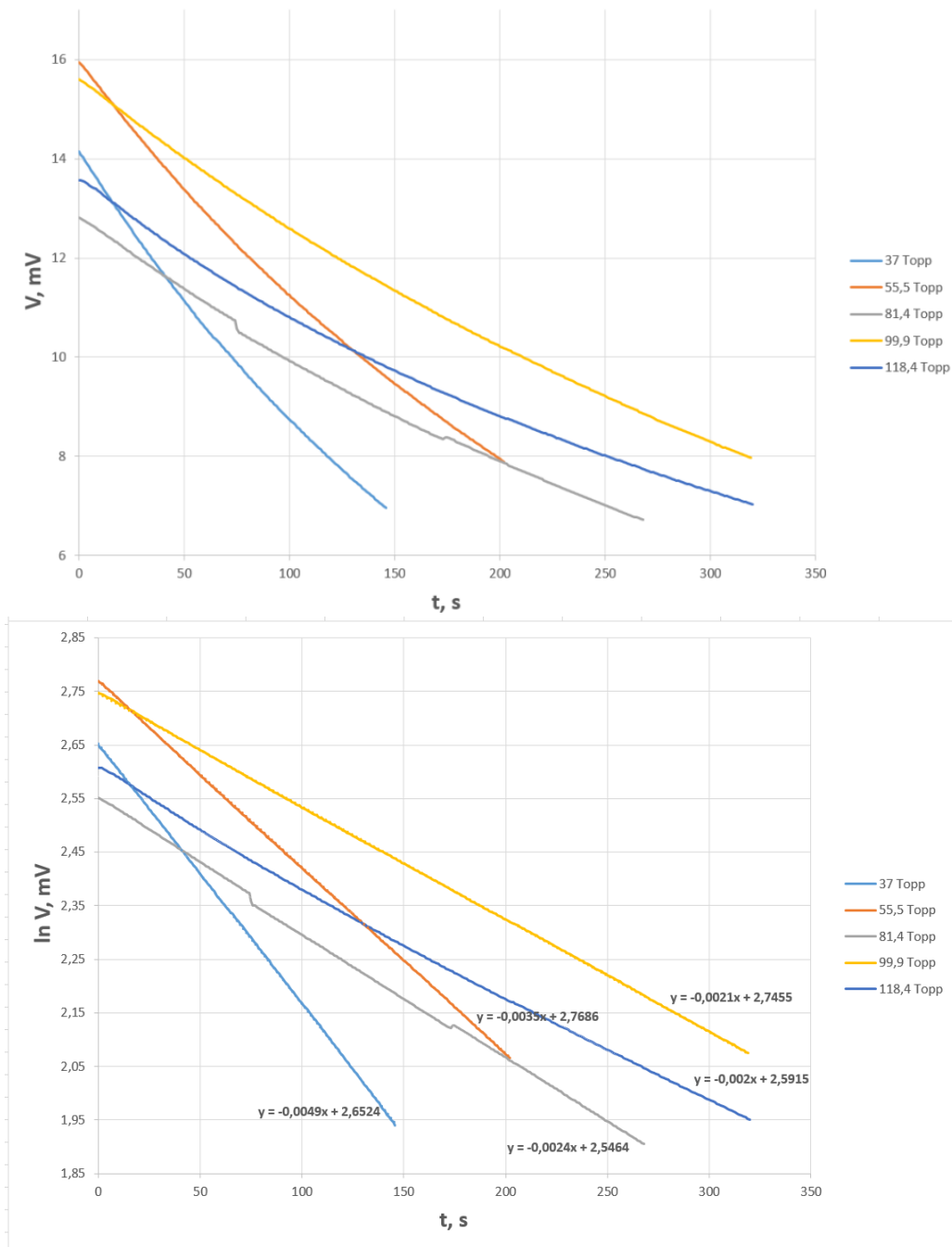


Рис. 2: Получившиеся графики

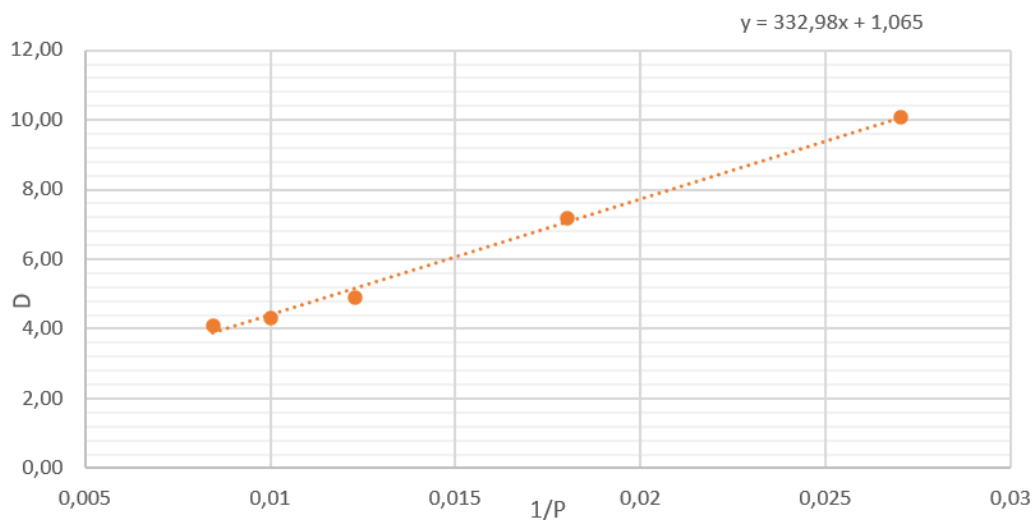
Итого, получились следующие значения величины $1/\tau$:

$P_{\text{раб}}, \text{Торр}$	$\tau, \text{с}$	$\Delta\tau, \text{с}$
37,0	204,08	0,14
55,5	285,71	0,32
81,4	416,67	0,46
99,9	476,19	0,87
118,4	500,01	0,93

Таким образом, посчитаем коэффициенты D по формуле $D = \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \frac{l}{S\tau}$. Получится:

$P_{\text{раб}}, \text{Торр}$	$D, \text{см}^2 \text{с}^{-2}$	$\Delta D, \text{см}^2 \text{с}^{-2}$
37,0	10.06	0,23
55,5	7.19	0,16
81,4	4.9	0,11
99,9	4.31	0,10
118,4	4.1	0,09

Построим график $D(1/P)$:



Как видно, точки легли на прямую (с точностью до какого-то значения). Значит, коэффициент взаимной диффузии линейно зависит от величины, обратной давлению. Таким образом найдем $D(P_0) = 0,44 \pm 0,05 \text{см}^2 \text{с}^{-1}$

Теперь найдем длину свободного пробега и эффективное сечение столкновений по формулам:

$$\lambda = 3D \sqrt{\frac{\pi\mu}{8RT}} = 104,8 \pm 6,3 \text{ нм}$$

$$\sigma = \frac{1}{n_0 \lambda} = 3,95 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$$

5 Заключение:

Мы провели ряд экспериментов, в результате которых получили коэффициенты взаимной диффузии при различных давлениях. Также мы получили этот коэффициент для атмосферного давления, он немного не сошелся с табличными данными. Также мы убедились, что коэффициент линейно зависит от величины, обратной давлению.