

Лабораторная работа 2.2.1
Исследование взаимной диффузии газов

Зажигина Е.А., Боева Г.Л., группа 816

МФТИ, Февраль 2019

1 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.

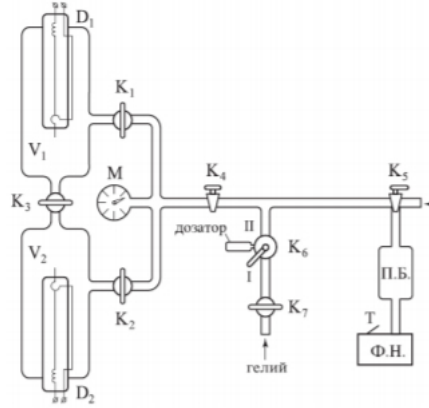
2 Оборудование:

измерительная установка; форвакуумный насос; баллон с газом (гелий); манометр; источник питания; магазин сопротивлений; гальванометр; секундомер.

3 Теоретические сведения:

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 взаимной (или концентрационной) диффузии.

Для исследования взаимной диффузии газов и определения коэффициента диффузии используется установка, изображенная на рис. 1. Два сосуда с объемами 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 каждого из компонентов в обоих сосудах с течением времени выравниваются.



Рассмотрим процесс выравнивания концентрации. Пусть концентрации одного из компонентов смеси в сосудах V1 и V2 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 (2.5):

$$j = -D \frac{\partial n}{\partial x} \quad (1)$$

где D — коэффициент взаимной диффузии газов, а j — плотность потока частиц. Расчеты упрощаются благодаря тому, что объём соединительной трубки мал по сравнению с объемами сосудов и концентрацию газов внутри каждого сосуда можно считать постоянной по всему объёму.

Диффузионный поток в любом сечении трубки одинаков. Поэтому $J = -DS \frac{\partial n}{\partial x}$ не меняется вдоль трубки. Следовательно,

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

Обозначим через $\Delta n_1, \Delta n_2$ изменения концентрации в объемах V1 и V2 за время Δt . 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 V2. Из закона сохранения вещества следует, что $V_1 \Delta n_1 + V_2 \Delta n_2 = 0$, откуда $V_1 \Delta n_1 = -V_2 \Delta n_2$. Эти изменения происходят вследствие диффузии, поэтому

$$V_1 \Delta n_1 = -V_2 \Delta n_2 = J \Delta t = -DS \frac{n_1 - n_2}{l} \Delta t. \quad (3)$$

Деля это равенство на Δt , получим

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

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

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

Введем $n_1 - n_2$ и проинтегрируем:

$$(n_1 - n_2) = (n_1 - n_2)_0 e^{-t/\tau} \quad (6)$$

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

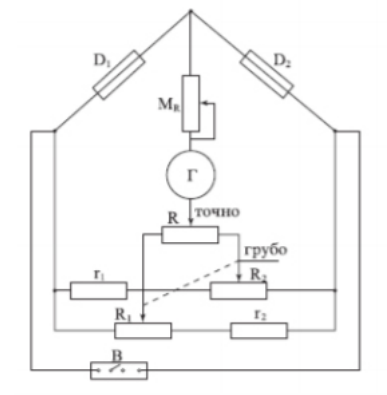
$$\tau = \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \frac{l}{SD} = \frac{c}{D} \quad (7)$$

Формула показывает, что разность концентраций убывает по экспоненциальному закону, и тем быстрее, чем меньше τ (постоянная времени процесса). Величина τ 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 и D_2 и используется зависимость теплопроводности газовой смеси от ее состава. Тонкая проволока радиуса $r_{пр}$, протянутая вдоль оси стеклянного цилиндра радиуса $R_{ц}$, нагреется током. Тепло от проволоки к стенке цилиндра переходит главным образом в следствии теплопроводности газа, находящегося внутри цилиндра. Количеств теплоа, передающееся стенке в единицу времени:

$$Q = \kappa \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{R_{ц}}{r_{пр}}\right)} (T_1 - T_2), \quad (8)$$

где κ - теплопроводность, L - длина нити, T_1, T_2 - температуры проволоки и стенки. При заданном режиме нагревания температура проволоки соответственно ее сопротивление определяются теплопроводностью газа и, следовательно, его составом.

Для измерения разности концентраций газов используется мостовая схема (см. рис. 2).



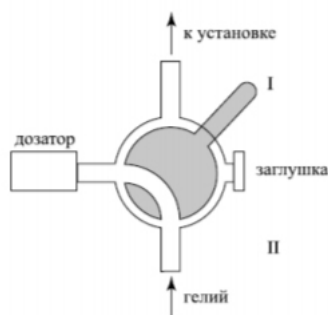
В процессе диффузии разность концентраций убывает по экспоненциальному закону. По тому же закону изменяются показатели гальванометра во времени:

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (9)$$

где N_0 - показатель в начальный момент времени.

4 Экспериментальная установка

Общий вид конструкции приведен на рис. 1. Схема моста приведена на рис. 2. На рис. 3 показана конструкция многоходового крана К6.



Установка состоит из двух сосудов V1 и V2, соединенных краном К3 форвакуумного насоса Ф.Н. с выключателем Т, манометра М и системы напуска гелия, включающей в себя краны К6 и К7. Кран К5 позволяет соединять форвакуумный насос либо с установкой, либо с атмосферой. Между форвакуумным насосом и краном К5 вставлен предохранительный баллон П.Б., защищающий кран К5 и установку при неправильной

эксплуатации ее от попадания форвакуумного масла из насоса Ф.Н. Сосуды V1 и V2 и порознь и вместе можно соединять как с системой напуска гелия, так и с форвакуумным насосом. Для этого служат краны K1, K2, K4 и K5. Манометр М регистрирует давление газа, до которого заполняют тот или другой сосуды.

5 Ход работы:

- Включим питание электрической схемы установки. Откроем краны K1, K2, K3. Очистим установку от всех газов, открыв кран K4 и включив Ф.Н: для этого ждем 3 минуты.
- Запустим воздух до рабочего давления Р раб. Сбалансируем мост. Заполним установку рабочей смесью и приступим к измерению: откроем K3 и снимем зависимость показания гальванометра от времени:

Р, торр	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
40	t, с	0	15,61	31,22	46,83	62,43	78,04	93,65	109,26	124,87	140,48
	U, мВ	255	236,4	219,8	203,3	189,6	176	163,3	152	142	132,5
	ln U	0	0,076	0,149	0,226	0,297	0,371	0,445	0,517	0,585	0,655

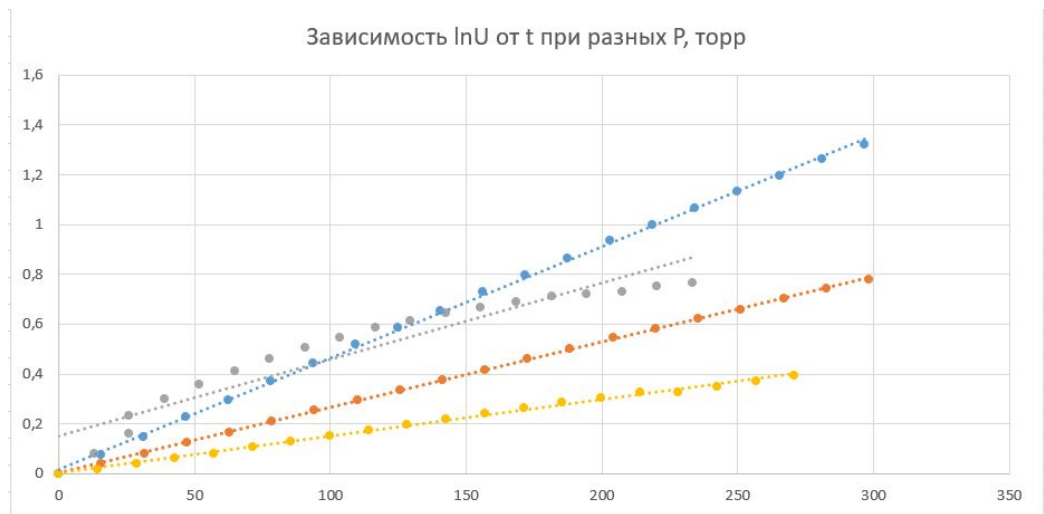
Р, торр	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
78	t, с	0	15,7	31,39	47,09	62,78	78,48	94,17	109,87	125,57	141,26
	U, мВ	255	245,3	235	225	216	206,5	198	190,1	182	175
	ln U	0	0,039	0,082	0,125	0,166	0,211	0,253	0,294	0,337	0,376

Р, торр	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
152	t, с	0	12,96	25,91	25,91	38,87	51,83	64,78	77,74	90,7	103,65
	U, мВ	255	235	217,1	202,1	189,2	178,2	169,3	161	154	148
	ln U	0	0,081	0,161	0,232	0,299	0,358	0,41	0,46	0,504	0,544

Р, торр	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
302	t, с	0	14,26	28,52	42,78	57,04	71,3	85,57	99,83	114,09	128,35
	U, мВ	255	251	245,5	240	235	229	224	219	214	209,7
	ln U	0	0,016	0,038	0,061	0,082	0,108	0,13	0,152	0,175	0,196

$$\sigma_p = 2 \text{ торр} \quad \sigma_t = 2c$$

- Убедимся, что процесс диффузии подчиняется экспоненциальному закону. Для этого построим график зависимости логарифма показаний гальванометра от времени.

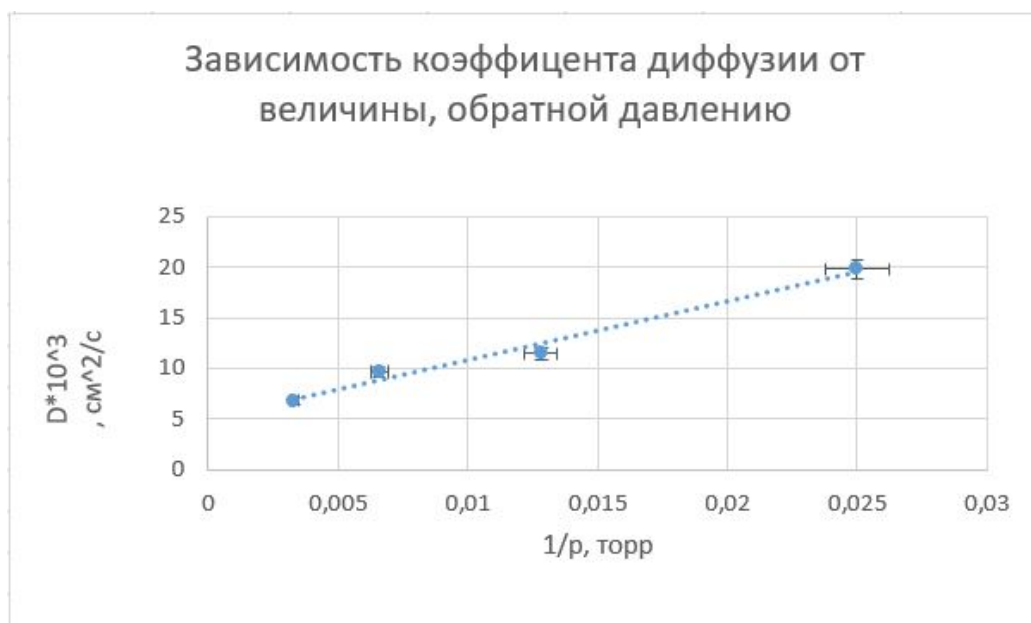


- Рассчитаем угловые коэффициенты каждой прямой. С помощью полученных значений рассчитаем коэффициенты взаимной диффузии при выбранных давлениях. Параметры установки: $V_1 = 800 \pm 5 \text{ cm}^3$ $V_2 = 800 \pm 5 \text{ cm}^3$ $S/L = 11.0 \pm 0.11/\text{cm}$
 $c = 4400 \text{ cm}^2$

Давление	Угл коэффициент = $a \cdot 10^{-3}$	$\Delta \ln P$	Δt	σ_a
40, торр	0,0045	-16,6	15,61	0,132928
78, торр	0,0026	0,043	15,69	0,175947
152, торр	0,0031	0,08	12,95	0,196775
302, торр	0,0015	0,022	14,26	0,185175

- Построим график зависимости коэффициента диффузии от давления в координатах D , $1/P$ - он имеет вид прямой линии.

P, торр	40	78	152	302
1/P, торр ⁻¹	0,025	0,012821	0,006579	0,003311
a * 10 ³ , c ⁻¹	4,5	2,6	3,1	1,55
c, см ²	4400	4400	4400	4400
D см ² /c	19,8	11,44	9,64	6,82
σ_a	0,132927829	0,175947	0,196775	0,185175
σ_t	2			
σ_D	0,265855657	0,351894	0,39355	0,370351



Атмосферное давление в нашем случае было равно 99,4 кПа = 745,5 торр. При значении 0,00134 торр⁻¹ коэф. диффузии равен = 5,8 см*см/с

- Оценим длину свободного пробега и размер молекулы:

$$\lambda = \frac{3D}{v} == 3D * \left(\frac{\mu}{3RT}\right)^{0.5} = 1,27 \pm 0.05 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$d = \sqrt{\frac{KT}{P\lambda}} = 18 \pm 0,7 \text{ нм}$$