

# Задача 2. 2. 1

## Исследование взаимной диффузии газов

Лось Денис (группа 611)

16 апреля 2017

**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

**В работе используются:** измерительная установка, форвакуумный насос, баллон с газом (гелий), манометр, источник питания, магазин сопротивлений, гальванометр, секундомер.

### Теоритическая часть

Диффузией называют самопроизвольное взаимное проникновение веществ в друг друга, происходящее вследствие хаотичного теплового движения молекул. При перемешивании молекул разного сорта говорят о взаимной(или концентрационной) диффузии.

В системе, состоящей из двух компонентов  $a$  и  $b$  (бинарная смесь), плотности потоков частиц (количество частиц, пересекающих единичную площадку в единицу времени) в результате взаимной диффузии определяются законом Фика:

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

где  $D$  — коэффициент взаимной диффузии компонентов. Равновесие достигается при равномерном распределении вещества по объёму.

В данной работе исследуется взаимная диффузия гелия и воздуха. Отметим, что давление и температура в системе предполагаются неизменными.

$P_0 = (n_{\text{He}} + n_{\text{возд}}) kT = \text{const}$ , где  $n_{\text{He}}$  и  $n_{\text{возд}}$  — концентрации диффундирующий газов. Поэтому для любых изменений концентрации справедливо  $\Delta n_{\text{возд}} = -\Delta n_{\text{He}}$ . Следовательно, достаточно ограничиться описанием диффузии одного из компонентов, например гелия.

Приведём теоритическую оценку для коэффициента диффузии. В работе концентрация гелия, как правило, мала. Кроме того, атомы гелия легче молекул, составляющих воздух, значит их средняя тепловая скорость велика по сравнению с

остальными частицами. Поэтому перемешивание газов в работе можно приближённо описывать как диффузию примеси легких частиц He на практически стационарном фоне воздуха. Коэффициент диффузии в таком приближении равен

$$D = \frac{1}{3} \lambda \bar{v}$$

## Схема эксперимента

Для исследования взаимной диффузии газов и измерения коэффициента взаимной диффузии  $D$  используется два сосуда объёмами  $V_1$  и  $V_2$ , соединённые трубкой длины  $L$  и сечения  $S$ . Предполагается, что сосуды заполнены смесью двух газов при одинаковом давлении, но с различной концентрацией компонентов. Вследствие взаимной диффузии, проходящей в соединительной трубке, концентрации компонентов в сосудах с течением времени выравниваются.

Отметим, что диффузия — относительно медленный процесс, и для его наблюдения необходимо отсутствие конвекции, т.е макроскопических течений газа как целого. Для этого необходимо обеспечить равенство давлений в сосудах до начала измерений.

В общем случае концентрации компонентов зависят от координат и времени во всей установке. Задача упрощается, если объём соединительной трубки мал по сравнению с объёмами сосуда — тогда концентрацию газов внутри каждого сосуда можно считать постоянной по всему объёму сосуда, и принять, что процесс выравнивания концентраций происходит в основном благодаря диффузии в трубке.

Предположив, что процесс выравнивания концентраций в сосудах происходит достаточно медленно, так что в трубке в любой момент успевает установиться стационарное течение, можем получить для разности концентраций примеси в сосудах:

$$\Delta n = \Delta n_0 \cdot e^{-t/\tau},$$

где  $\tau = \frac{1}{D} \frac{VL}{2S}$  — характерное время выравнивания концентраций между сосудами, определяемое геометрическими размерами установки и коэффициентом диффузии.

## Методика измерений

Для измерения разности концентраций в установке применяются датчики теплопроводности. При этом используется тот факт, что теплопроводность смеси  $\kappa$  зависит от её состава. В общем случае зависимость довольно сложна, однако при малой разности  $\Delta n$  в сосудах можно ожидать, что разность теплопроводностей будет изменяться прямо пропорционально  $\Delta n$ :

$$\Delta \kappa = \kappa(n_2) - \kappa(n_1) \approx \text{const} \cdot \Delta n$$

Эксперименты показывают, что если доля примеси гелия составляет менее 15% , отклонение от линейной зависимости не превышает 0.5%, что в нашем эксперименте вполне достаточно.

Сами датчики теплопроводности устроены следующим образом. Тонкая платиновая проволочка, протянутая вдоль оси стеклянного цилиндра, заполненного газом, нагревается током. При заданной мощности нагревания приращение температуры проволоочки и, следовательно, приращение её сопротивления пропорциональны теплопроводности газа. Для измерения сопротивлений используется мостовая схема, позволяющая определить разность показаний датчиков с высокой точностью. При незначительном различии в составах смесей показания гальванометра, подсоединённого к диагонали моста, будут пропорциональны разности концентраций смеси:  $U \sim \Delta\kappa \sim \Delta n$ . Следовательно показания гальванометра будут изменяться по закону

$$U = U_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

## Экспериментальная установка

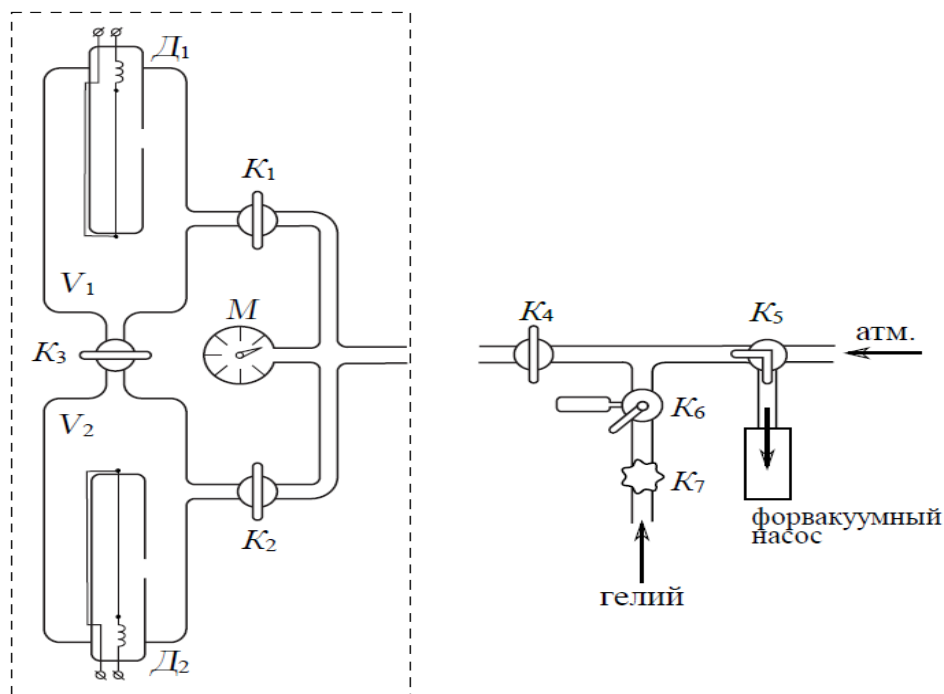


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Измерительная установка соединена с системой откачки и напуска воздуха и гелия. Для откачки используется форвакуумный насос. Датчики теплопроводности, расположенные в сосудах  $V_1$  и  $V_2$  соответственно, включены в мостовую электрическую схему. В одну из диагоналей моста включён высокочувствительный вольтметр, к другой подключается источник небольшого постоянного напряжения.

## Ход работы

1. Будем балансировать измерительный мост при предполагаемом рабочем давлении  $P_{\Sigma}$ , а далее готовить рабочие смеси для проведения измерений. В одном из сосудах должен оказаться чистый воздух, а в другом смесь воздуха с гелием. Давления в сосудах должны быть одинаковы и равны рабочему  $P_{\Sigma}$ . Далее будем открывать кран  $K_3$  и измерять, как меняются показания вольтметра с течением времени  $U(t)$ . Измерения будем продолжать до тех пор, пока напряжение не упадёт хотя бы на 30 – 50%. Для каждого рабочего давления  $P_{\Sigma}$  найдём коэффициент взаимной диффузии.

$P$ , торр	$1/P$ , 1 / кПа	$t$ , с	$U$ , дел	$\ln U$	$D$ , см <sup>2</sup> / с	$\Delta D$ , см <sup>2</sup> / с
75	0.10	0	255	5.54	1.36	0.1
		22.86	250	5.52		
		45.71	244.3	5.50		
		68.57	239	5.48		
		91.43	234	5.46		
		114.29	229	5.43		
		137.14	225	5.42		
		160	221	5.39		
		182.86	216	5.38		
		205.71	212.3	5.35		
		228.57	209	5.34		
		251.43	206	5.32		
		274.29	203	5.31		
		297.14	200	5.29		
		320	198	5.28		
82	0.09	0	255	5.54	3.86	0.26
		7.86	249	5.51		
		15.71	244.3	5.49		
		23.57	239.4	5.47		
		31.43	233	5.45		
		39.29	229	5.43		
		47.14	225.9	5.42		
		55	221	5.40		
		62.86	218	5.38		
		70.71	214	5.36		
		78.57	211	5.35		
		86.43	207	5.33		
		94.29	203.7	5.32		
		102.14	200	5.30		
		110	197	5.28		

$P$ , торр	$1/P$ , 1 / кПа	$t$ , с	$U$ , дел	$\ln U$	$D$ , см <sup>2</sup> / с	$\Delta D$ , см <sup>2</sup> / с
164	0.05	0	255	5.54	1.85	0.17
		10.86	253	5.53		
		21.71	250.3	5.52		
		32.57	248	5.51		
		43.43	245	5.50		
		54.29	242	5.49		
		65.14	239	5.48		
		76	236	5.46		
		86.86	233	5.45		
		97.71	230	5.44		
		108.57	227.4	5.43		
		119.43	224.6	5.41		
		130.29	222	5.40		
		141.14	219	5.39		
		152	216	5.38		

Таблица 1: Зависимость  $U$  от  $t$

2. Построим графики зависимости  $\ln U(t)$  и  $D(\frac{1}{P})$ .

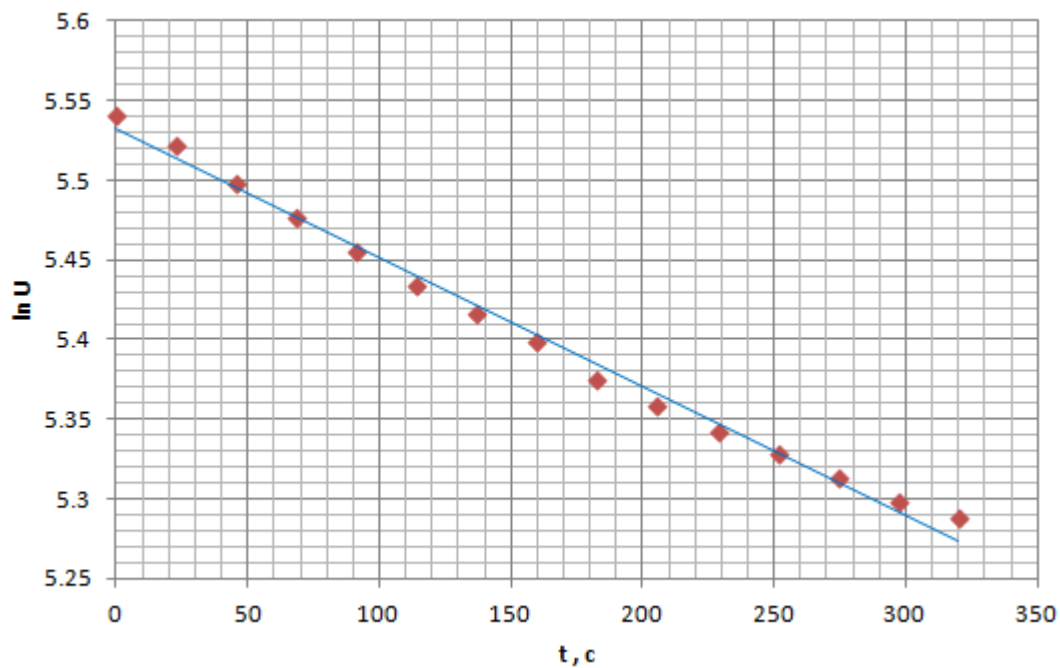


Рис. 2: График зависимости  $\ln U$  от  $t$  при  $P = 75$  торр

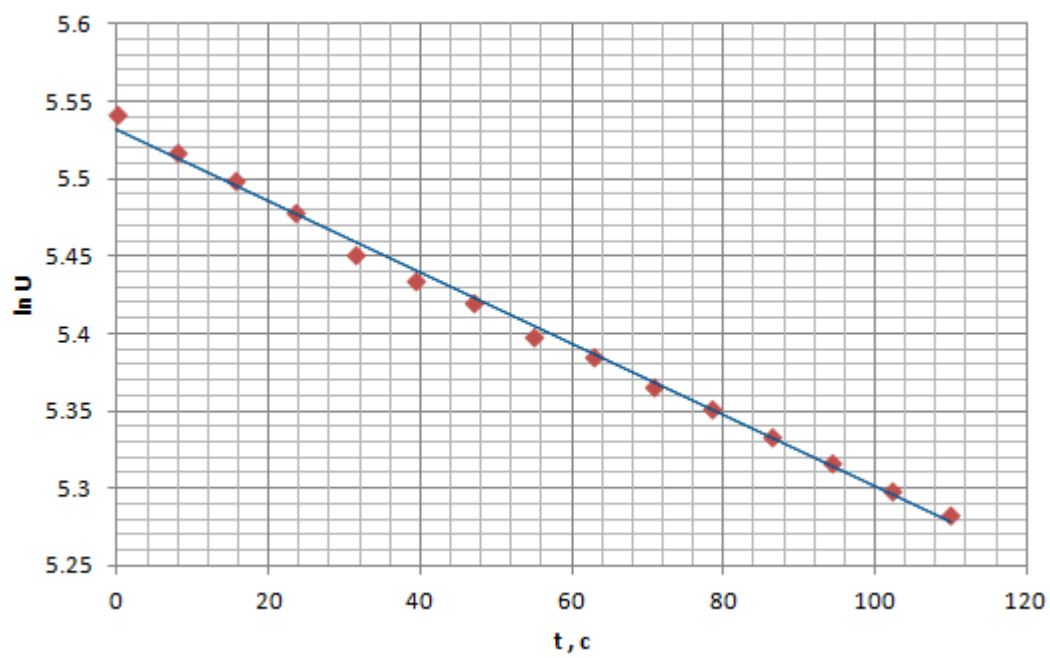


Рис. 3: График зависимости  $\ln U$  от  $t$  при  $P = 82$  торр

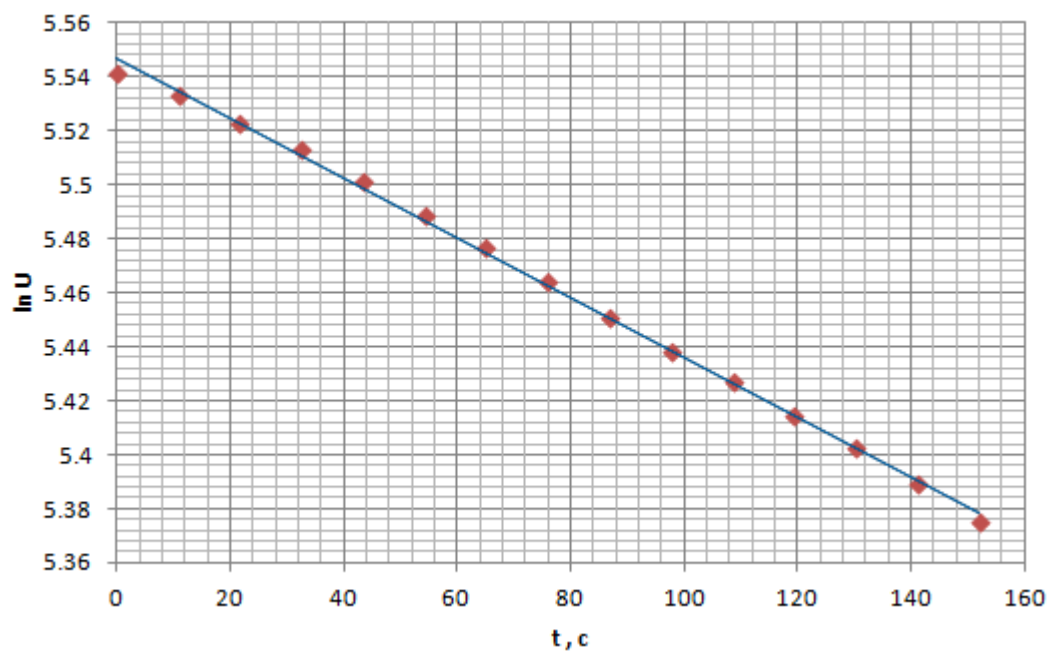


Рис. 4: График зависимости  $\ln U$  от  $t$  при  $P = 164$  торр

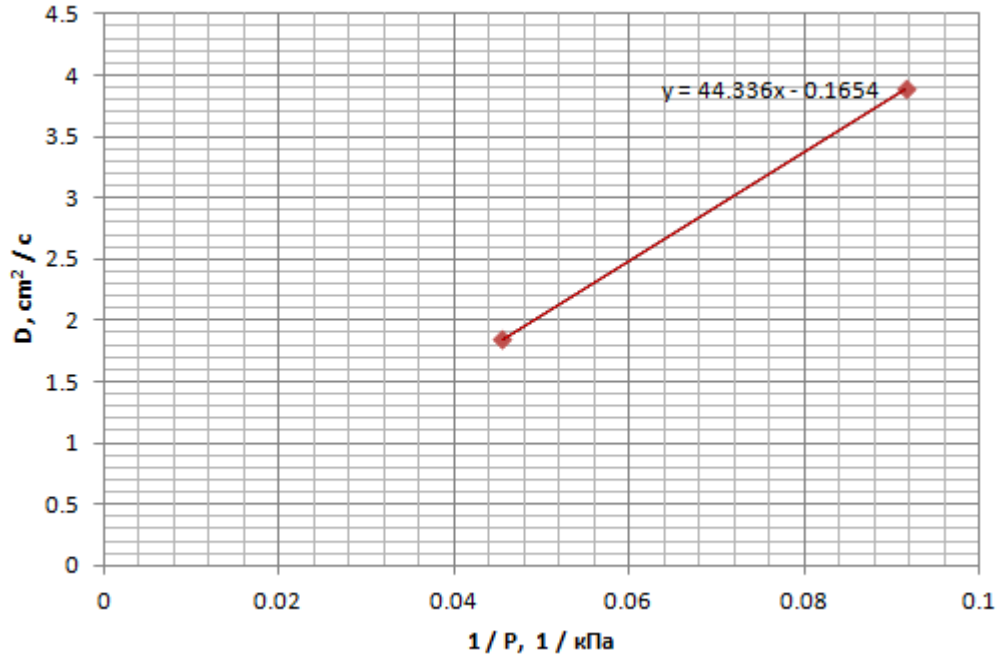


Рис. 5: График зависимости коэффициента диффузии  $D$  от  $\frac{1}{P}$

Экстраполируя график к атмосферному давлению, получим соответствующий коэффициент взаимной диффузии:

$$D_{\text{атм}} = (0.27 \pm 0.02) \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

Заметим, что полученный результат достаточно существенно отличается от табличного.

- По полученным результатам оценим длину свободного пробега атомов гелия в воздухе  $\lambda_{\text{He}}$  при нормальных условиях, а также эффективное сечение столкновения атомов гелия с частицами воздуха  $\sigma_{\text{He - возд}}$ .

$$\lambda_{\text{He}} = (96.7 \pm 3.2) \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

$$\sigma = (42.4 \pm 1.6) \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$$