



Московский Физико-Технический Институт  
(национальный исследовательский университет)

Отчет по эксперименту

---

## Исследование взаимной диффузии газов

---

*Работа №2.2.1; дата: 21.02.22*

*Семестр: 2*

Выполнил:  
Кошелев Александр

Группа:  
Б05-105

## 1. Аннотация

В данной работе изучается взаимная диффузия газов. Дается определение коэффициента взаимной диффузии и изучается влияние рабочего давления системы на коэффициент взаимной диффузии газов на примере пары воздух-гелий.

**Схема установки:**

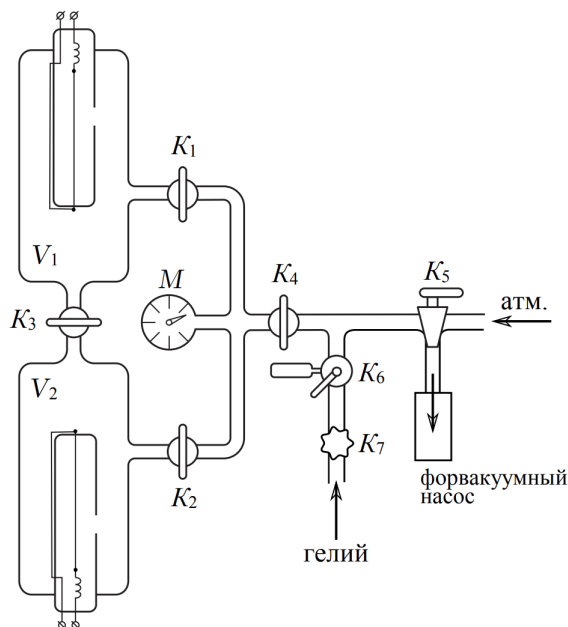


Рис. 1: Схема установки

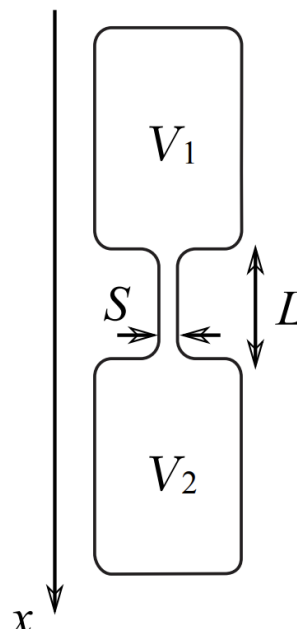


Рис. 2: Схема установки

**В работе используются:** два сосуда для газов  $V_1$  и  $V_2$ , система кранов  $K_i$ , манометр  $M$ , баллон сжатого гелия, форвакуумный насос (Рис. 1).

Для исследования взаимной диффузии газов и измерения коэффициента взаимной диффузии  $D$  используются два сосуда объемами  $V_1$  и  $V_2$  ( $V_1 \approx V_2 \equiv V$ ), соединенные трубкой длины  $L$  и сечения  $S$  (Рис. 2). 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. Важно отметить, что диффузия – относительно медленный процесс, и для его наблюдения необходимо отсутствие конвекции, т. е. макроскопических течений газа. Для этого необходимо обеспечить равенство давлений и температур в сосудах до начала измерений.

## 2. Теоретические сведения

В общем случае концентрации компонентов  $n(t, x)$  зависят от как от координаты, так и времени. Задача упрощается, если объем соединительной трубки мал по сравнению с объемами сосудов – тогда концентрации газов  $n_1(t)$  и  $n_2(t)$  внутри каждого сосуда можно считать постоянными по всему объему сосуда, и принять, что процесс выравнивания концентраций происходит благодаря диффузии в трубке.

Применяя закон Фика в трубке, получим:

$$j = -D \frac{\partial n}{\partial x} = \text{const}$$

Следовательно, распределение концентрации в трубке  $n(x)$  — линейная функция:

$$n(x) = \frac{\Delta n}{L}x$$

и плотность потока частиц всюду постоянна и равна

$$j = -D \frac{\Delta n}{L}$$

где  $\Delta n = n_2 - n_1$  — разность концентраций гелия на концах трубки.

Теперь вернёмся к процессу выравнивания концентраций в сосудах. Частицы перетекают из сосуда 2 в сосуд 1 по трубке и концентрации  $n_1(t)$  и  $n_2(t)$  меняются во времени. Предположим, что этот процесс происходит достаточно медленно, так что в трубке в любой момент времени успевают установиться практически стационарное течение, описываемое предыдущими формулами. Такое приближение называют квазистационарным. Кроме того, будем считать, что в пределах каждого сосуда частицы распределены равномерно, так что концентрации примеси вблизи трубки и в остальных частях сосуда отличаются мало. Тогда полное число частиц примеси в сосудах равно соответственно  $N_1 = n_1V$  и  $N_2 = n_2V$ . Произведение плотности потока  $j$  на площадь сечения трубки  $S$  даёт количество частиц, пересекающих в единицу времени любое поперечное сечение трубки. Поэтому

$$\frac{dN_1}{dt} = jS, \quad \frac{dN_2}{dt} = -jS$$

Выразим отсюда скорость изменения  $\Delta n$ . Вычитая из второго равенства первое и деля результат на объём сосуда  $V$ , с учетом  $j$  получим

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau}$$

где введено обозначение

$$\tau = \frac{1}{D} \frac{VL}{2S}$$

Интегрируя, получаем, что разность концентраций будет убывать по экспоненциальному закону

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

где  $\Delta n_0$  — разность концентраций примеси в сосудах в начальный момент времени. Видно, что величина  $\tau$  есть характерное время выравнивания концентраций между сосудами. Оно определяется геометрическими размерами установки и коэффициентом диффузии.

Для измерения разности концентраций в установке применяются датчики теплопроводности. При этом используется тот факт, что теплопроводность смеси зависит от её состава. При этом для напряжения на парах выполняется:

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

### 3. Проведение эксперимента

#### 3.1. Определение вязкости воды

##### Измерение параметров установки

Занесем в таблицу отношение длины трубки  $L/S$  и объем сосудов  $V$ .

$L/S, \text{м}^{-1}$	$V, \text{м}^3$
$1500 \pm 10$	$(8.00 \pm 0.05) \cdot 10^{-4}$

Табл. 1: Параметры установки

##### Измерение коэффициента диффузии

Таблицы измерения напряжений очень большие по размеру, поэтому не будем приводить их в данном пункте. Приведем лишь построенный на основании таблицы график и полученные значения  $D$  от давления  $P$ .

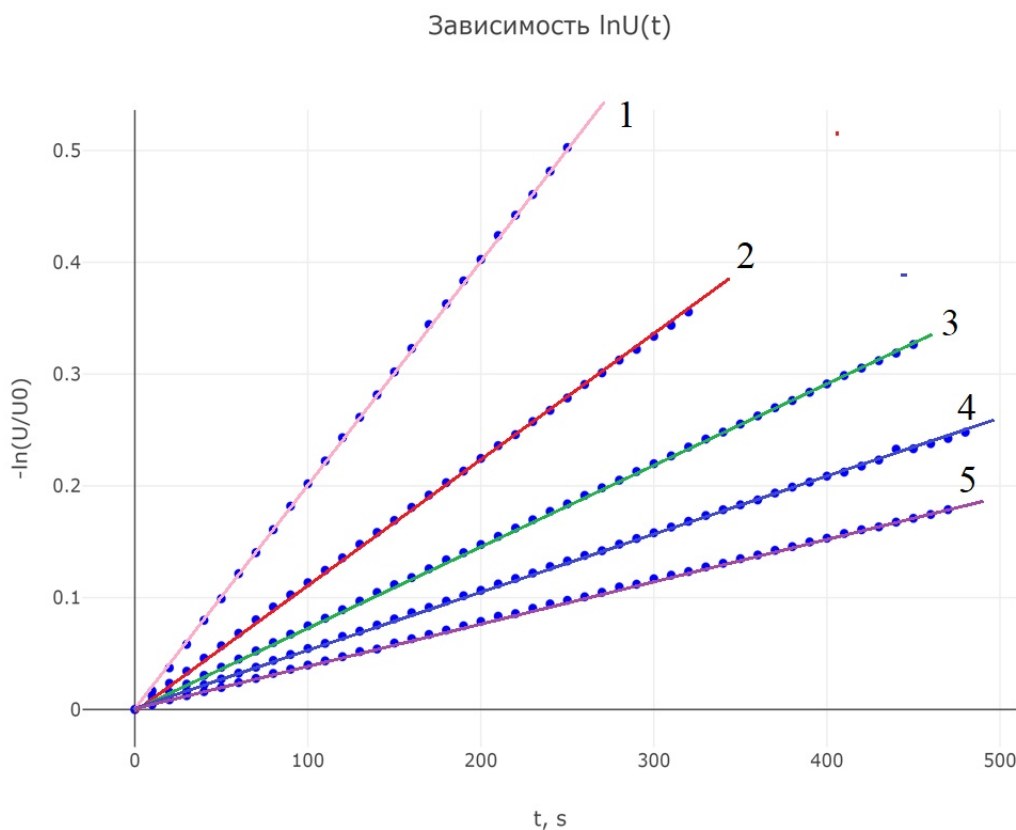


Рис. 3: Графики зависимостей  $-\ln(U/U_0)(t)$

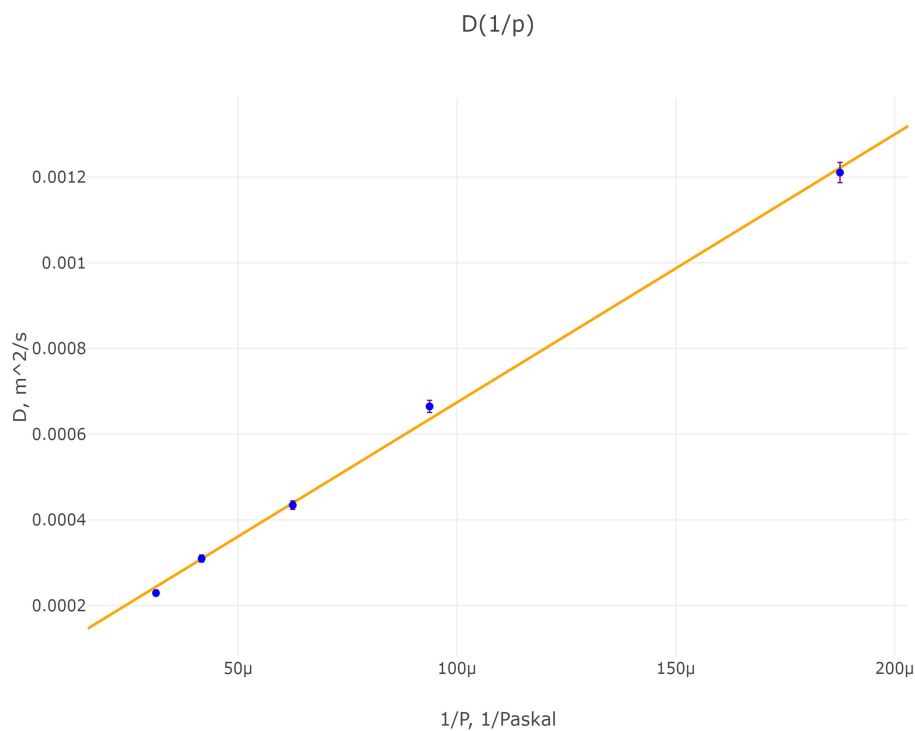
Отсюда через коэффициенты наклона получаем

$P, \text{торр}$	40	80	120	180	240
$D \cdot 10^4, \text{м}^2/\text{с}$	$12.11 \pm 0.01$	$6.65 \pm 0.01$	$4.34 \pm 0.01$	$3.10 \pm 0.01$	$2.29 \pm 0.01$

Табл. 2: Подсчет коэффициентов диффузии

Теперь можно построить зависимость  $D(1/p)$ , получим вид зависимости и подсчитаем значение в точке, соответствующей атмосферному давлению:

$$D_0 = (10.9 \pm 1.5) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$$



**Рис. 4:** График зависимости  $D(1/P)$

**Определение длины свободного пробега и эффективного сечения столкновения атомов гелия с молекулами воздуха** Из полученных ранее данных определим:

$$\lambda_0 = \frac{3D}{v} = 260 \pm 70 \text{ нм}$$

$$\sigma_0 = \frac{kT}{\lambda P} = (1.6 \pm 0.4) \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$$

## 4. Выводы

В ходе работы определено значение коэффициента диффузии пары воздух-гелий при атмосферном давлении  $D_0 = (10.9 \pm 1.5) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Также определена длина свободного пробега  $\lambda_0 = 260 \pm 70 \text{ нм}$  и эффективное сечение столкновения атомов гелия с молекулами воздуха.

Все полученные значения совпадают с референсными в пределах 2 величин отклонения.