

Работа 2.2.1

Исследование взаимной диффузии газов

Стрижак Даниил

1 Аннотация

В данной работе регистрируется зависимость концентрации гелия в воздухе от времени с помощью датчиков теплопроводности при разных начальных давлениях смеси газов, а так же определяется коэффициент диффузии по результатам измерений.

2 Теоретические сведения

Диффузия – самопроизвольное взаимное проникновение веществ друг в друга, происходящее вследствие хаотичного теплового движения молекул. При перемешивании молекул разного сорта говорят о *взаимной диффузии*.

В системе из двух компонентов зависимость плотности потока компонентов $j_{a,b}$ от их концентрации $n_{a,b}$, подчиняются *закону Фика*:

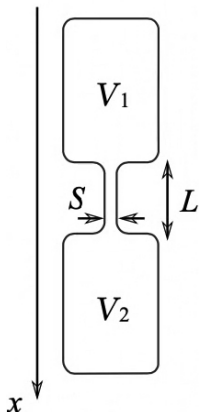
$$j_{a,b} = -D \nabla n_{a,b}$$

В данной работе исследуется взаимная диффузия гелия и воздуха в тонкой трубе. Давление и температура в условиях опыта предполагаются неизменными ($P = (n_{He} + n_{возд.}) \cdot k_B$; $T = const$), где n_{He} и $n_{возд.}$ – концентрации гелия и воздуха соответственно. Поэтому для любых изменений концентрации справедливо $\Delta(n_{He} = -\Delta n_{возд.})$, значит, достаточно ограничиться описанием диффузии одного из компонентов, например для гелия.

$$j_{He} = -D \frac{\partial n_{He}}{\partial x}$$

В силу того, что в работе концентрация гелия должна быть мала и из-за того, что атомы гелия существенно легче молекул, составляющих воздух, средняя тепловая скорость частиц гелия велика по сравнению с частицами воздуха, а значит, перемешивание газов в данном эксперименте можно приближенно описывать диффузией примеси легких частиц He на практически стационарном фоне воздуха. Коэффициент диффузии в таком приближении равен.

$$D = \frac{1}{3} \lambda \bar{v}; \quad \bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}$$



Для исследования взаимной диффузии газов и измерения коэффициента взаимной диффузии D используется два сосуда объёмами V_1 и V_2 ($V_1 \approx V_2 = V$), соединенные 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.

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.

В данном опыте объем трубки сильно меньше объема сосуда, чтобы можно было считать концентрацию компонентов не зависящей от координат.

Рассчитаем зависимость концентрации от времени в данном эксперименте:

$$\begin{aligned}
 j = -D \frac{\partial n}{\partial x} = \text{const} &\Rightarrow n(x) = \frac{\Delta n}{L} x \Rightarrow j = -D \frac{\Delta n}{L} \\
 \frac{dN_1}{dt} = jS, &\quad \frac{dN_2}{dt} = -jS \Rightarrow \frac{d(\Delta n)}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau} \\
 \tau = \frac{VL}{2SD} &\quad \Delta n = \Delta n_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \tau \sim \frac{L^2}{2D}
 \end{aligned}$$

3 Метод измерений

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

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

Эксперименты показывают, что если доля примеси гелия составляет менее 15%, отклонение от линейной зависимости не превышает 0,5%, что для наших целей вполне достаточно.

Для измерения сопротивлений используется мостовая схема, позволяющая определять разность показаний датчиков с высокой точностью. Мост балансируется при заполнении сосудов одной и той же смесью. При заполнении сосудов смесями различного состава возникает «дизбаланс» моста. При незначительном различии в составах смесей показания вольтметра, подсоединённого к диагонали моста, будут пропорциональны разности концентраций примеси.

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

Где U_0 – показание гальванометра в начальный момент времени. Из зависимости напряжения от времени можно получить соответствующее значение коэффициента диффузии.

4 Оборудование и инструментальные погрешности

В работе используются: измерительная установка; форвакуумный насос; баллон с гелием; манометр; источник питания; магазин сопротивлений; гальванометр; секундомер.

Инструментальные погрешности измерений:

- манометр – $0,5 \text{ кгс/см}^2$
- вольтметр – $0,1 \text{ мВ}$
- объем – 10 см^3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

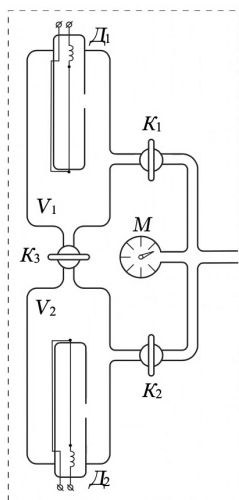


рисунок 1

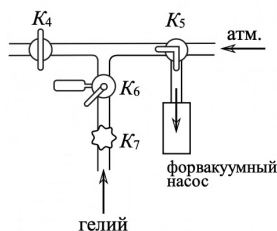


рисунок 2

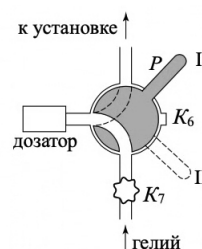


рисунок 3

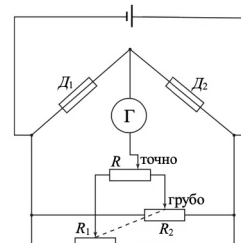


рисунок 4

Схема измерительной части установки приведена на рис. 1. Она соединена с системой откачки и напуска воздуха и гелия. Для откачки используется форвакуумный насос. Один из вариантов конструкции изображен на рис. 2. Измерительная часть установки состоит из двух сосудов V_1 и V_2 , размещённых вертикально. Краны K_1 и K_2 служат для управления откачкой и подачей газа в сосуды. Диффузия осуществляется через тонкую короткую трубку, соединяющую сосуды, оснащённую краном K_3 . К соединительным трубкам подключен манометр M , измеряющий разность давлений между соединительными трубками и атмосферой. Для подачи малых порций гелия предусмотрен двухходовый кран с дозатором (рис. 3). Датчики теплопроводности D_1 и D_2 , расположенные в сосудах V_1 и V_2 соответственно, включены в мостовую электрическую схему согласно рис. 5. В одну из диагоналей моста включён высокочувствительный вольтметр Γ , к другой подключается источник небольшого постоянного напряжения. Сопротивления проволок датчиков составляют одно из плеч моста. Второе плечо составляют переменные сопротивления R_1 , R_2 и R , служащие для установки показаний вольтметра Γ на нуль. Балансировку необходимо проводить перед каждым экспериментом заново: при этом установка заполняется чистым газом при давлении, близком «рабочему».

5 Результаты измерений и обработка данных

5.1 Подготовка к эксперименту

Ознакомимся с установкой. Согласно руководству: включим питание электрической схемы, затем очистим установку от всех газов, которые в ней есть. Напустим в установку воздух до рабочего давления чтобы сбалансировать мост на рабочем давлении. Сбалансируем мост. Заполним установку рабочей смесью: в сосуде V_2 должен быть воздух, а в сосуде V_1 — смесь воздуха, с гелием.

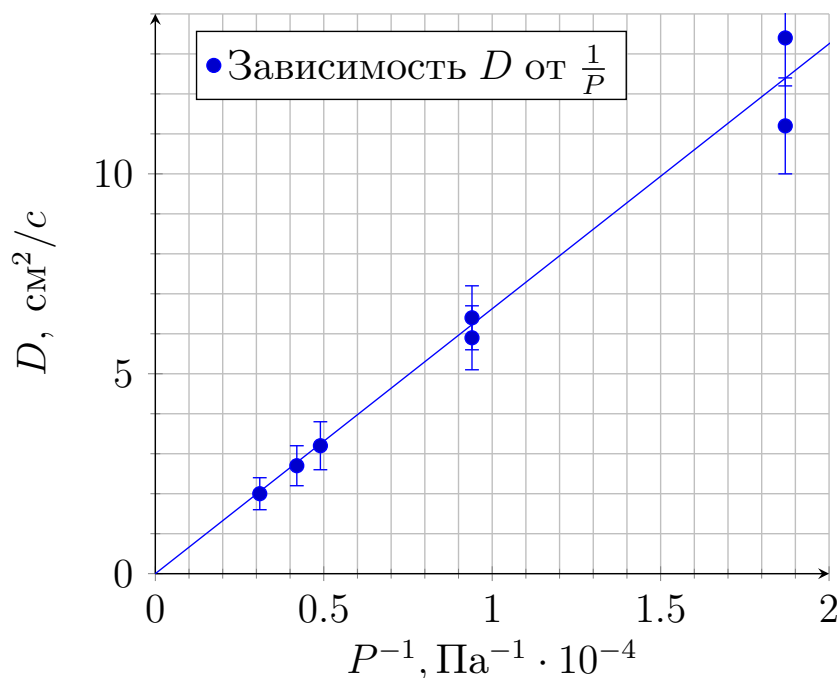
Атмосферное давление – 97.5 кПА, причем минимум давления, откачанный насосом – 98 кгс/см², что стоит учесть при расчете погрешностей.

5.2 Проведение измерений

Проведем измерения после подготовки для разных значений давления. В таблице ниже приведены обработанные результаты измерений. Повторные измерения при 40 и 80 торр производились в обратных пропорциях гелия и воздуха (1,675 частей гелия и 0,2 части воздуха). Центровка в данном случае производилась гелием. Графики, с помощью которых производился расчет времени релаксации для определенного давления представлены в приложении. Таблицы с измерениями и программный код, обрабатывающий данные, лежат в отдельных файлах в силу своей громоздкости.

No	P, кгс/см ²	P, торр	τ , с	D , см ² /с	$\frac{1}{P}$, Па ⁻¹ · 10 ⁻⁴
1	92	40	192	10,7	1,87
2	87	80	321	6,4	0,94
3	77	154	647	3,2	0,49
4	73,5	180	767	2,7	0,42
5	65	240	1047	2,0	0,31
6	92,5	40	149	13,7	1,87
7	87,5	80	350	5,9	0,94

Ниже приведена графическая обработка данных, откуда можно найти коэффициент диффузии при атмосферном давлении.



Из графика можно сделать заключение, что зависимость является прямой пропорциональностью с коэффициентом $k = 6,6 \pm 1,0 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^3}$, а коэффициент диффузии при атмосферном давлении составляет $D = 0,66 \pm 0,10 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$ при табличном значении $D = 0,57 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$. Из вычисленного значения коэффициента взаимной диффузии оценим длину свободного пробега атомов гелия в воздухе при нормальных условиях:

$$\lambda_{He} = 3D \cdot \sqrt{\frac{\pi\mu}{8RT}} = (1,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

Оценим среднее сечение столкновения частиц гелия с воздухом

$$n_{\Sigma} = n_{He} + n_{air} = P_{\Sigma}/k_B T, \sigma = 1/\lambda n_{\Sigma} = 1/3D \cdot \sqrt{8k_B T/\pi\mu} \cdot k_B T/P_{\Sigma}: \sigma = (4,3 \pm 0,6) \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$$

6 Выводы и расчёт погрешностей

6.1 Погрешности

$$\frac{\Delta D}{D} = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_1^n ((\frac{\Delta V}{V})^2 + (\frac{\Delta t}{t})^2) + (\frac{\Delta \frac{L}{S}}{\frac{L}{S}})^2 + (\frac{\Delta V}{V})^2 + \sigma_{\text{экс}}^2} \approx 14\%$$

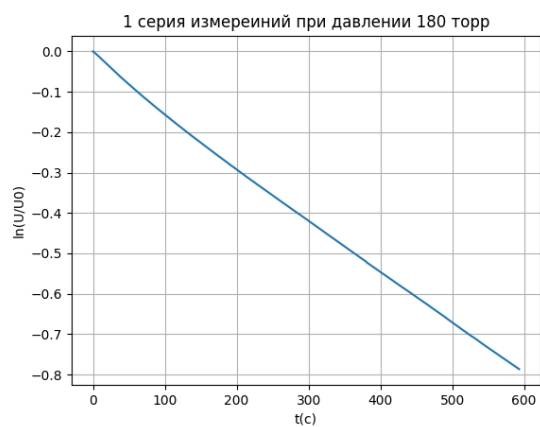
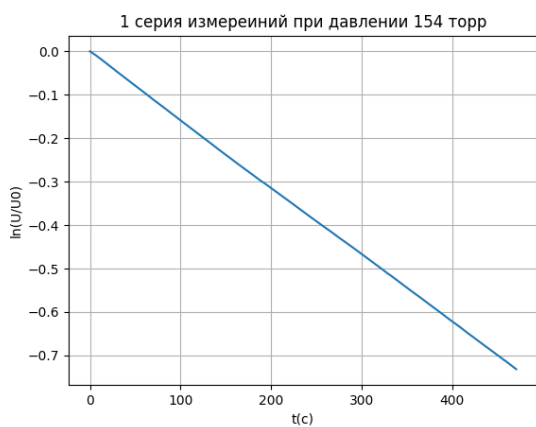
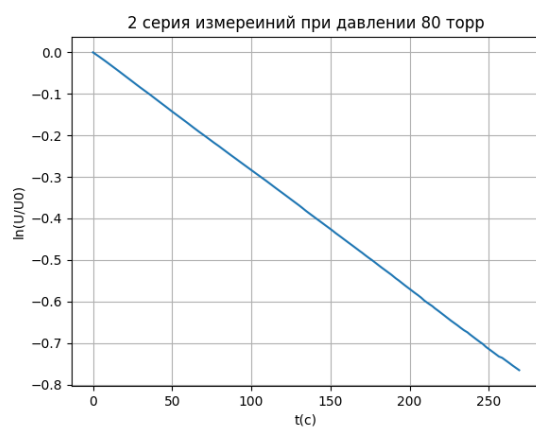
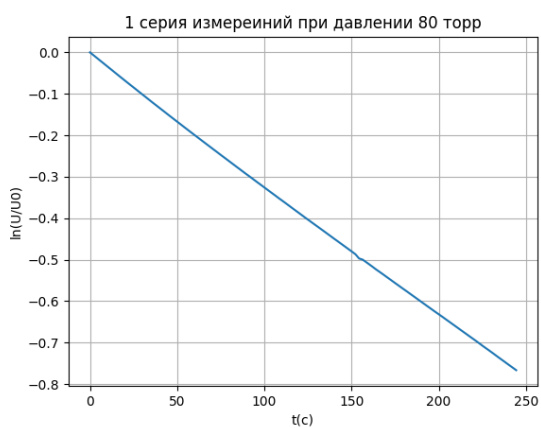
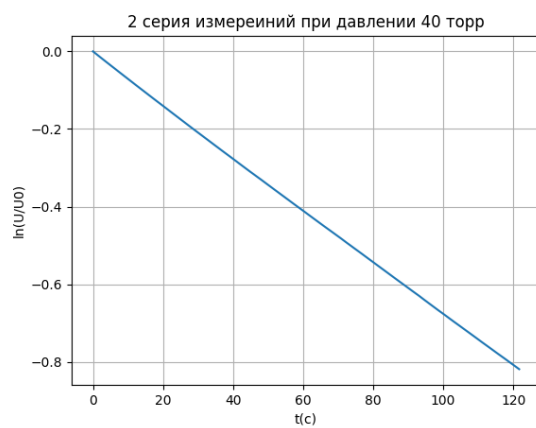
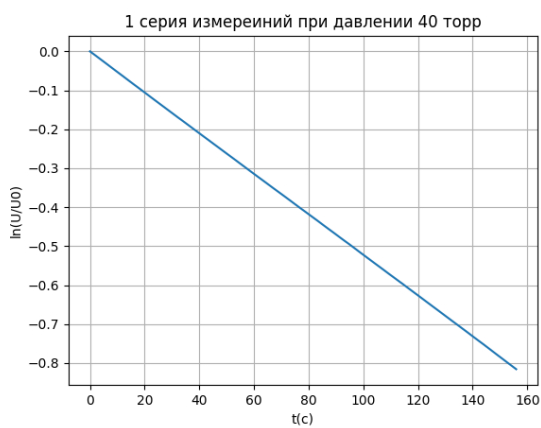
$$\frac{\Delta \lambda_{He}}{\lambda_{He}} = \sqrt{(\frac{\Delta D}{D})^2 + \frac{1}{4}(\frac{\Delta T}{T})^2} \approx 14\%$$

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} = \sqrt{(\frac{\Delta D}{D})^2 + \frac{9}{4}(\frac{\Delta T}{T})^2 + (\frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{\Sigma}})^2} \approx 15\%$$

6.2 Вывод

В результате эксперимента было получено значение коэффициента диффузии гелия в воздухе, значение длины свободного пробега и среднее значение сечения столкновения частиц гелия с воздухом. Небольшое отклонение, пренебрежимо малое в этой задаче, связано с нагревом воздуха из-за теплообмена с нагретым проводником. В целом, полученные данные совпадают с табличными в пределах погрешности, что говорит о том, что методика эксперимента достаточно хороша и можно оценивать не только порядок.

7 Приложение



1 серия измерений при давлении 240 торр

