

Работа 2.2.1 Исследование взаимной диффузии газов

Иван Сладков

18 февраля 2022 г.

1 Аннотация

В данной работе определяется зависимость концентрации гелия в воздухе от времени при помощи датчиков теплопроводности для различных начальных давлений смеси газов, по результатам измерений производится вычисление коэффициента диффузии.

2 Теоретические сведения

Диффузией называется самопроизвольное перемешивание молекул, происходящее вследствие их теплового движения. Рассмотрим процесс выравнивания концентрации. Пусть концентрации одного из компонентов смеси в сосудах V_1 и V_2 равны n_1 и n_2 . Плотность диффузационного потока любого компонента определяется законом Фика:

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

где D — коэффициент взаимной диффузии газов, а j — плотность потока частиц. Диффузационный поток в любом сечении трубы одинаков. Поэтому $J = -DS(\partial n / \partial x) = \text{const}$. Следовательно,

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

Обозначим через Δn_1 и Δn_2 изменения концентрации в объемах V_1 и V_2 за время Δt . Тогда

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

Отсюда

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

$$V_1 \frac{dn_2}{dt} = DS \frac{n_1 - n_2}{l} \quad (5)$$

Введём новую переменную и интегрированием получим:

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

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

Получим количество тепла, передающееся стенке в единицу времени:

$$Q = \kappa \frac{2\pi L}{\ln(R_{\text{п}}/r_{\text{п}})} (T_1 - T_2), \quad (8)$$

где κ — теплопроводность, L — длина нити, T_1, T_2 — температуры проволочки и стенки. При $Q = \text{const}$ температура проволочки и соответственно ее сопротивление определяются теплопроводностью газа и, следовательно, его составом.

При расчёте длины свободного пробега молекулы будем применять формулу

$$D = \frac{1}{3} \lambda < v >, \quad (9)$$

$$D = \frac{1}{3} \lambda \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} \quad (10)$$

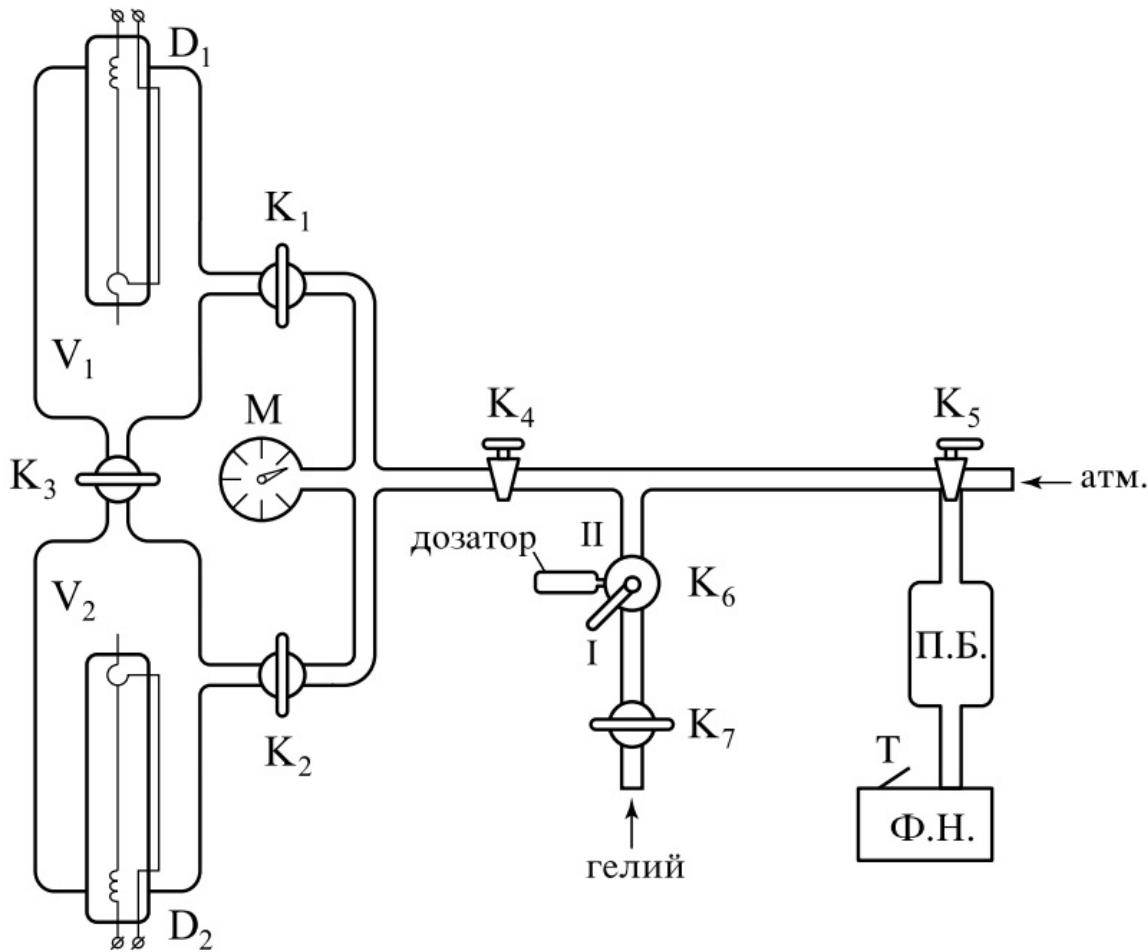


Рис. 1: Установка для определения коэффициента диффузии

3 Оборудование, параметры установки и инструментальные погрешности

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.

3.1 Параметры установки

Объем цилиндра для гелия: $V = 775 \pm 10 \text{ см}^3$

Объем цилиндра для воздуха: $V = 775 \pm 10 \text{ см}^3$

Давление гелия в рабочей смеси: $P_{\text{рел}} = 0.2 P_{\text{раб}}$

Давление гелия в рабочей смеси: $P_{\text{рел}} = 0.2 P_{\text{раб}}$

Атмосферное давление: $P_{\text{атм}} = 98 \pm 0.1 \text{ КПа} = 980 \pm 1 \text{ КБ}$

Характеристика отверстия: $\frac{l}{s} = 5.3 \pm 0.11/\text{см}$

3.2 Инструментальные погрешности

Вакуумметр: $\Delta = \pm 500 \text{ Па}$

4 Результаты измерений и обработка данных

4.1 Проверка зависимости разности концентраций

Убедимся, что процесс диффузии подчиняется закону (6). Для этого для каждого опыта построим графики $\ln V(T)$ на рис. 2, 3, 4, 5, 6.

Все графики, кроме 5 с достаточной точностью являются прямыми линиями.

4.2 Определение коэффициента диффузии

Чтобы вычислить D – коэффициент диффузии, учтём, что $n_1 - n_2 \propto U$ и что $V_1 = V_2$, и преобразуем формулу (7) к виду:

$$D = \frac{lV}{2\tau S}, \quad (11)$$

$$D = \frac{lV}{2(-\frac{1}{k})S}, \quad (12)$$

где k – тангенс угла наклона графиков.

Расчитаем коэффициент диффузии с учётом погрешностей. Погрешность D вычисляется по формуле

$$\sigma_D = D \sqrt{\frac{\sigma_l^2 S^2}{l^2} + \frac{\sigma_V^2}{V^2} + \frac{\sigma_\tau^2}{\tau^2}} \quad (13)$$

Давление, Б	$k, 1/\text{с}$	Коэффициент диффузии $D, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$
5.50E+04	-0.00483	9.9 ± 0.2
1.00E+05	-0.00320	6.6 ± 0.2
1.60E+05	-0.00195	4.00 ± 0.09
2.00E+05	-0.00162	3.33 ± 0.08
2.55E+05	-0.00118	2.42 ± 0.06

Таблица 1: Коэффициент диффузии при разных давлениях

4.3 Определение среднего пробега молекулы λ

Нанесём полученные результаты на график 7. Точки, отображающие результаты опытов, должны ложиться на прямую, т. к. в формуле (2) $J \propto P$. По всей видимости, на опыте при $P = 55000$ Б была допущена ошибка в подготовке рабочей смеси, что привело к неверному результату (см. график 7). Используем остальные результаты.

Экстраполируем прямую до значения атмосферного давления 1013250 Б.

$$D = \frac{k}{P} = 0.67 \pm 0.03 \frac{\text{см}^2}{\text{с}} \quad (14)$$

Применим формулу (10). Тогда $\lambda = 4.35 * 10^{-5}$ см.

По формуле $\lambda = \frac{1}{\sigma n}$, где $n = n_0$ – число Лошмидта, получим $\sigma = 8.5 * 10^{-16} \text{ см}^2$

5 Вывод

При помощи датчиков теплопроводности определили зависимости концентраций гелия в воздухе от времени при различных давлениях газов; по результатам измерений определили константу диффузии, оценили в условиях опыта длину свободного пробега молекул и эффективную площадь их поперечного сечения

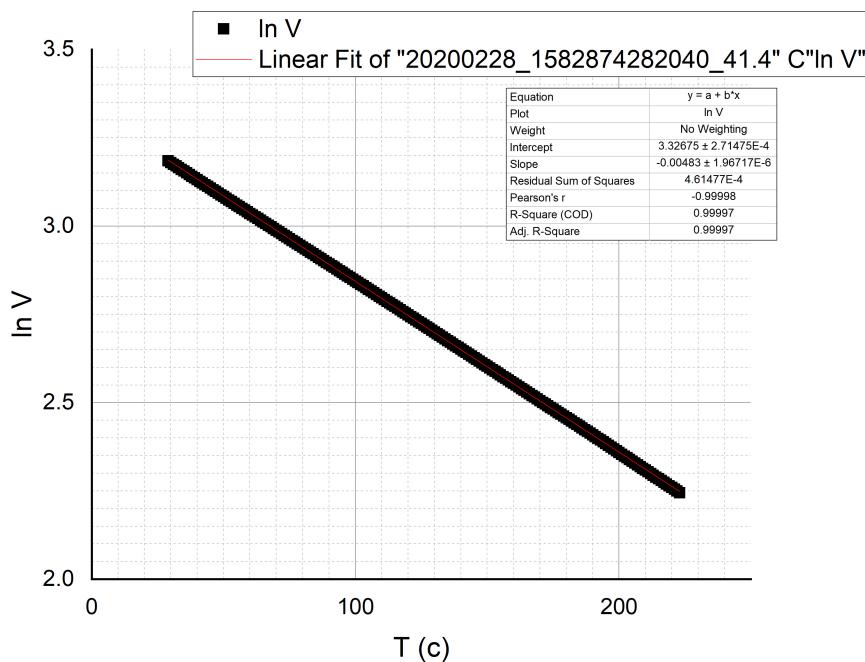


Рис. 2: График для давления 41 торр

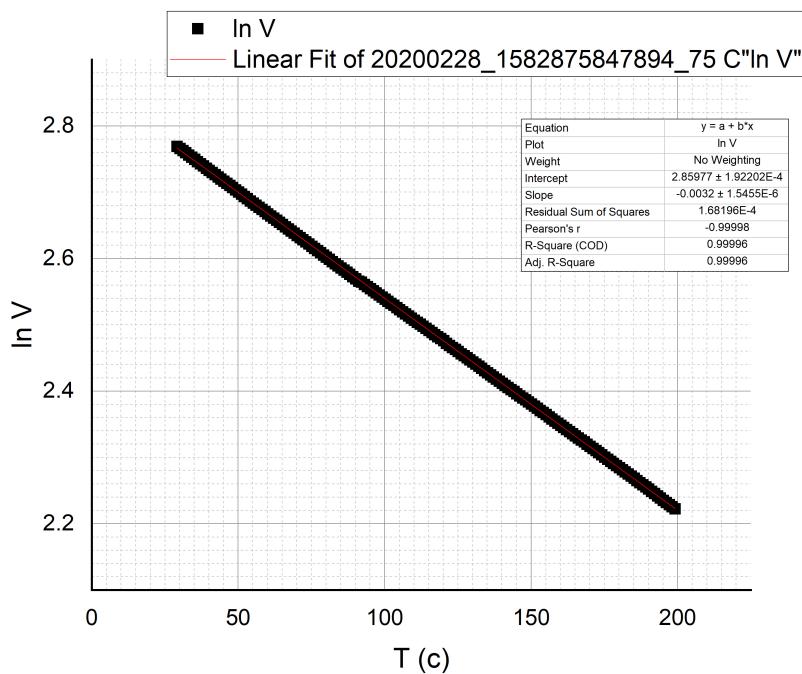


Рис. 3: График для давления 75 торр

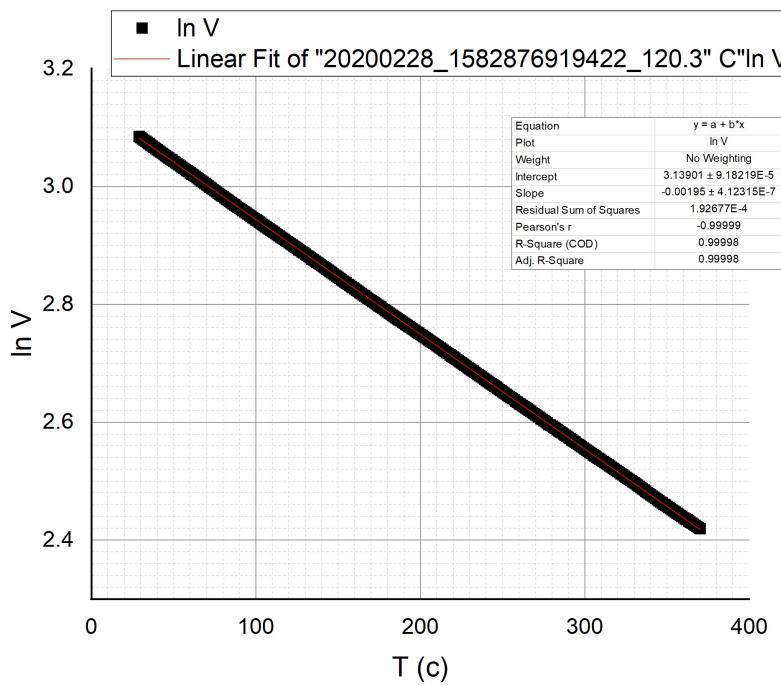


Рис. 4: График для давления 120 торр

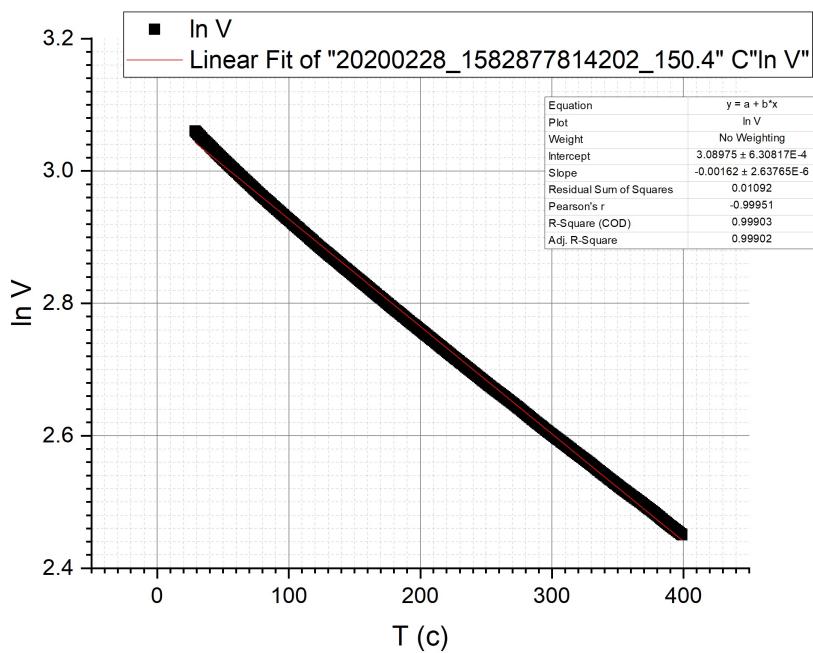


Рис. 5: График для давления 150 торр

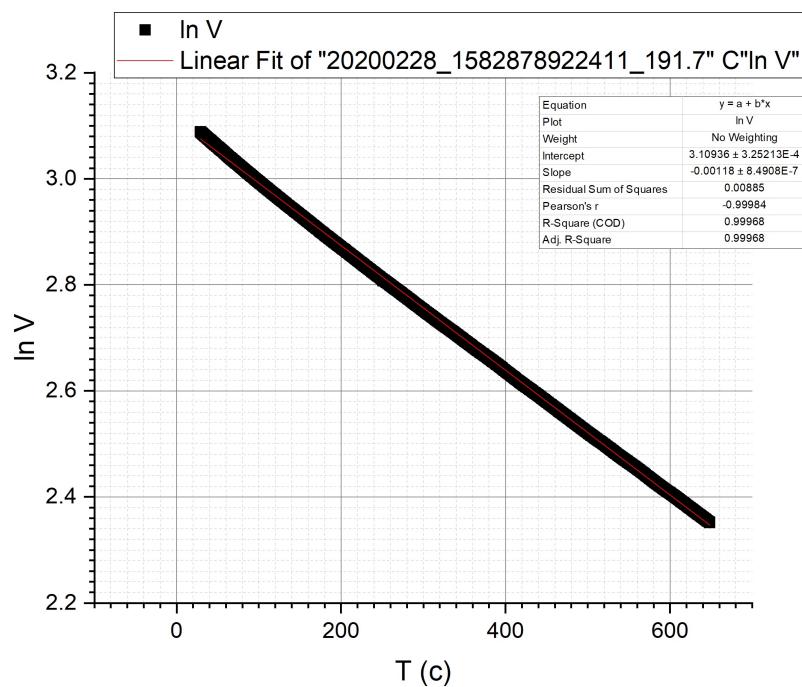
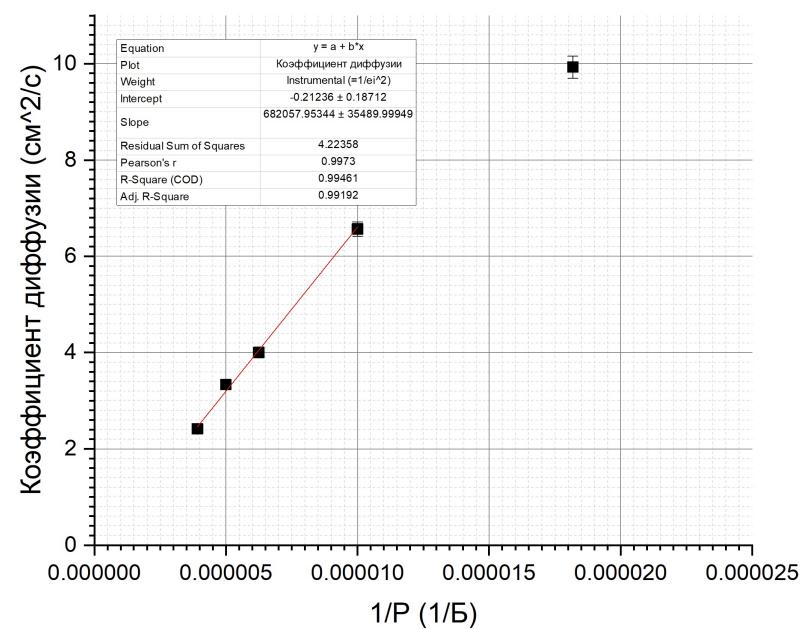


Рис. 6: График для давления 191 торр

Рис. 7: Зависимость $D(\frac{1}{P})$