

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
ФАКУЛЬТЕТ ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ

Лабораторная работа № 2.2.1
Исследование взаимной диффузии газов

Серебренников Даниил
Группа Б02-826

Долгопрудный, 2019 г.

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.

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

1 Теоретическая часть

Диффузией называют самопроизвольное взаимное проникновение веществ друг в друга происходящее вследствие хаотичного теплового движения молекул. При перемешивании молекул разного сорта говорят о взаимной (или концентрационной) диффузии. В системе, состоящей из двух компонентов а и b (бинарная смесь), плотности потоков частиц 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. Знак «минус» отражает тот факт, что диффузия идёт в направлении выравнивания концентраций. 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 неизменным: $P_0 = (n_{He} + n_{Air})kT = const$, где n_{He} и n_{Air} — концентрации диффундирующих газов. Поэтому для любых изменений концентраций справедливо $\Delta n_{Air} = -\Delta n_{He}$. Следовательно, достаточно ограничиться описанием диффузии одного из компонентов, например гелия.

Приведём теоретическую оценку для коэффициента диффузии. В работе концентрация гелия, как правило, мала ($n_{He} \ll n_{Air}$). Кроме того, атомы гелия легче молекул, составляющих воздух ($m_{He} \ll m_{N_2}, m_{O_2}$), значит их средняя тепловая скорость велика по сравнению с остальными частицами. Поэтому перемешивание газов в работе можно приближенно описывать как диффузию примеси лёгких частиц He на практически стационарном фоне воздуха. Коэффициент диффузии в таком приближении равен

$$D = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle, \quad (2)$$

где $\lambda = \frac{1}{n\sigma}$ — длина свободного пробега диффундирующих частиц; $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$ — их средняя тепловая скорость.

Предполагая, что процесс диффузии будет квазистационарным, можно показать, что разность концентраций будет убывать по экспоненциальному закону

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-t/\tau}, \quad (3)$$

где τ — характерное время выравнивания концентраций между сосудами, определяемое следующей формулой

$$\tau = \frac{1}{D} \frac{VL}{2S}. \quad (4)$$

2 Модель эксперимента

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

ные 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.

Для измерения разности концентраций в установке применяются датчики теплопроводности. При этом используется тот факт, что теплопроводность смеси κ зависит от её состава. В общем случае зависимость $\kappa(n)$ довольно сложна, однако при малой разности Δn 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.

При заданной мощности нагревания приращение температуры проволоочки и, следовательно, приращение её сопротивления пропорциональны теплопроводности газа. Для измерения сопротивлений используется мостовая схема, позволяющая определять разность показаний датчиков с высокой точностью. Мост балансируется при заполнении сосудов (и датчиков) одной и той же смесью. При заполнении сосудов смесями различного состава возникает «разбаланс» моста. При незначительном различии в составах смесей показания гальванометра, подсоединённого к диагонали моста, будут пропорциональны разности концентраций примеси: $U \propto \Delta\kappa \propto \Delta n$. В процессе диффузии разность концентраций убывает по закону (3), и значит по тому же закону изменяются во времени показания гальванометра

$$U = U_0 e^{-t/\tau}, \quad (5)$$

где U_0 – показание в начальный момент времени. Измеряя экспериментально зависимость $U(t)$, можно получить характерное время процесса τ , откуда по формуле (4) определить коэффициент диффузии D .

3 Экспериментальные данные

В таблице 1 приведены некоторые параметры установки и случайные ошибки измерения величин, определяемых в ходе эксперимента.

Таблица 1: Некоторые параметры установки и ошибки измерений.

	T , К	P_0 , торр	V , см ³	L/S , 1/см
Величина	293	760	775	5,3
Погрешность	0	0	10	0,1
ε , %	0	0	1,3	1,9

На рисунке 1 представлены графики зависимости $\ln U$ от t , построенные при различных рабочих давлениях P . Аппроксимированная прямая была построена методом наименьших квадратов. Экспериментальные данные были получены в компьютерной программе, предназначенной для данной лабораторной работы.

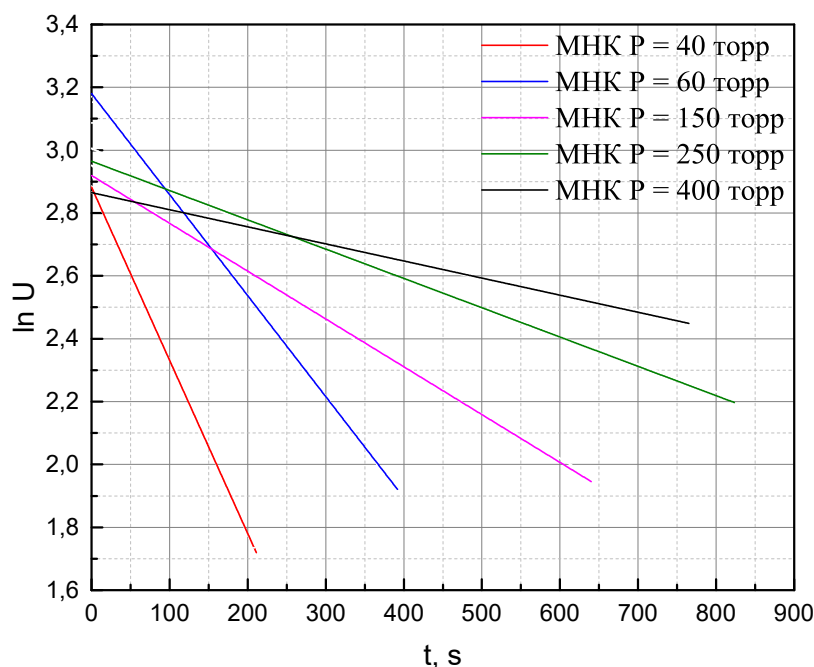


Рис. 1: Зависимости $\ln U$ от t .

Результаты анализа графиков и результаты вычислений коэффициентов диффузии представлены в таблице 2. Погрешностью наклонов графиков можно пренебречь в силу их малой относительной погрешности $\varepsilon = 0,1\%$.

Таблица 2: Результаты анализа прямых (рис. 1).

P , торр	$d \ln U / dt$	τ , с	$1/P$, торр ⁻¹	D , см ² /с	ε_D , %
40	-0,005508	181,55	0,0250	11,3	2,3
60	-0,003214	311,16	0,0167	6,60	2,3
150	-0,001522	657,17	0,0067	3,13	2,3
250	-0,000932	1072,49	0,0040	1,91	2,3
400	-0,000544	1838,95	0,0025	1,12	2,3

По полученным значениям коэффициентов диффузии построим график (рис. 2) зависимости D от $1/P$.

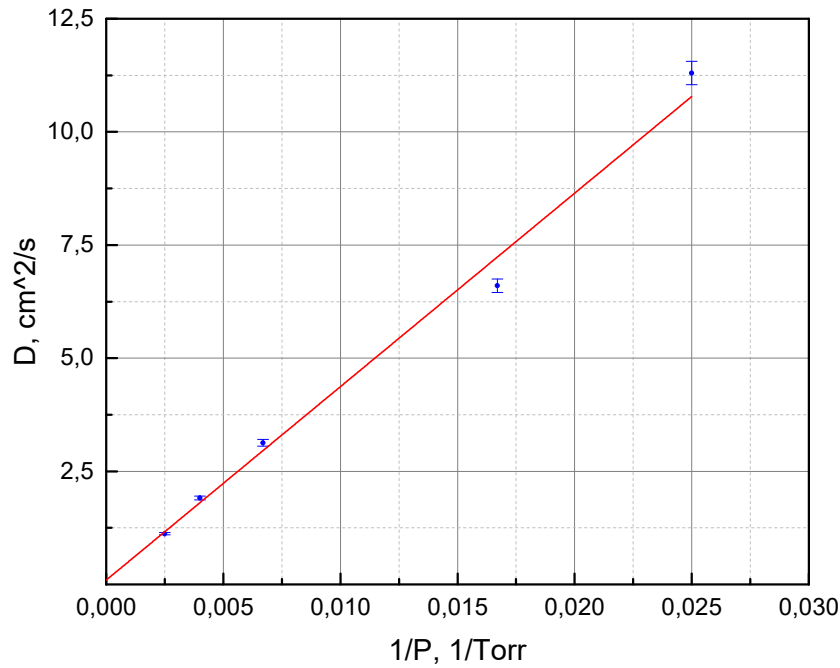


Рис. 2: Зависимости D от $1/P$.

По графику методом наименьших квадратов определим коэффициент взаимной диффузии гелия с воздухом при атмосферном давлении P_0 . Погрешность оценим по следующей формуле $\sigma_D = \frac{1}{P_0}\sigma_a + \sigma_b$, где a и b - коэффициенты, задающие прямую $D = a\frac{1}{P} + b$.

Таблица 3: Результаты анализа прямой (рис. 2).

a , см ² ·торр/с	σ_a , см ² ·торр/с	b , см ² /с	σ_b , см ² /с	D , см ² /с	σ_D , см ² /с	ε , %
427	26	0,10	0,12	0,66	0,15	23

Дополнительно можно вычислить длину свободного пробега гелия при комнатной температуре и атмосферном давлении в воздухе λ и эффективное сечение столкновений атомов гелия с частицами воздуха σ . Результаты вычислений представлены в таблице 4.

Таблица 4: Дополнительные характерные параметры гелия в воздухе.

$\langle v \rangle$, м/с	λ , нм	σ_λ , нм	σ , 10^{-15} см ²	σ_σ , 10^{-15} см ²
1328,5	150	30	2,7	0,5

Обсуждение результатов

В ходе лабораторной работы нам удалось определить коэффициент взаимной диффузии D гелия и воздуха при комнатной температуре и давлении, равном физической атмосфере. Полученный результат $D = (0,66 \pm 0,15)$ см²/с в пределах погрешности сходится с табличным значением $D = 0,62$ см²/с. Не мало важным фактом является то, что наша прямая (рис. 2) смещена на некоторую константу относительно нуля, поэтому наибольшую погрешность вносит этот сдвиг. Если экстраполировать прямую, считая, что она обязана пройти через нуль из теоретических соображений, то $D = (0,58 \pm 0,01)$ см²/с.

Однако всё же среднее значение полученной нами величины превышает табличное на 6,5 %. Очевидно, что это в первую очередь связано с течами газа через краны, которые не идеально изолируют баллоны. Кроме того, у установки отсутствуют пассивная и активная виброзащиты, поэтому любые колебания стола, на котором находится установка, приводят к искажению показаний вольтметра. Стоит отметить, что в силу неполного обмена энергией между молекулами газа и поверхностью нити её температура несколько выше, чем температура прилегающих слоёв газа – на её поверхности возникает температурный скачок, который может исказить так же результаты.

Мы дополнительно оценили длину свободного пробега гелия при комнатной температуре и атмосферном давлении в воздухе $\lambda = (150 \pm 30)$ нм и эффективное сечение столкновений атомов гелия с частицами воздуха $\sigma = (2,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-15}$ см².

Выводы

1. Определили коэффициент взаимной диффузии гелия и воздуха, который с учётом погрешности сходится с табличным значением: $D = (0,58 \pm 0,01)$ см²/с.
2. Рассчитали длину свободного пробега гелия при комнатной температуре и атмосферном давлении в воздухе $\lambda = (150 \pm 30)$ нм.
3. Рассчитали эффективное сечение столкновений атомов гелия с частицами воздуха $\sigma = (2,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-15}$ см².