

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2.2.1

Исследование взаимной зависимости газов

Пилюгин Л. С.
Б02-212
22 марта 2023 г.

1 Теоритические сведения

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

Диффузия в системе из двух компонентов подчиняется закону Фика:

$$j_a = -D \frac{\partial n_a}{\partial x}$$

D — коэффициент взаимной диффузии.

В работе исследуется взаимная диффузия гелия и воздуха. Давление и температура неизменны:

$$p = (n_{\text{He}} + n_{\text{в}}) k_B T = \text{const}$$

Поэтому $\Delta n_{\text{в}} = -\Delta n_{\text{He}}$. Значит, достаточно описать диффузию одного из компонентов.

Концентрация и молярная масса гелия много меньше соответствующих параметров воздуха, поэтому тепловая скорость молекул гелия велика по сравнению со скоростью молекул воздуха. Значит, диффузию гелия можно описывать как диффузию примеси легких частиц гелия на фоне неподвижных молекул воздуха. В этом приближении коэффициент диффузии равен

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

$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}$ — средняя тепловая скорость частиц примеси. λ — их длина свободного пробега. $\lambda = 1/n_0 \sigma$, n_0 — концентрация рассеивающих центров, σ — сечение столкновения частиц примеси с частицами фона.

Для бинарной смеси формула $D = \frac{1}{3} \lambda \bar{v}$ сохраняется, но $\lambda = 1/n_{\Sigma} \sigma$, $n_{\Sigma} = n_{\text{He}} + n_{\text{в}} = P/k_B T$, а \bar{v} — средняя относительная скорость частиц.

Таким образом, коэффициент диффузии обратно пропорционален давлению и не зависит от пропорций компонентов.

Для исследования взаимной диффузии газов используется два сосуда объемами $V_1 \approx V_2 = V$, соединенные трубкой длины L и сечением S . Сосуды заполнены смесью двух газов при одинаковом давлении, но разной концентрации компонентов. Из-за диффузии со временем концентрации компонентов выравниваются.

Диффузия — медленный процесс и для его наблюдения необходимо отсутствие конвекции, т.е. нужно обеспечить равенство давлений и температур в сосудах до начала измерений.

Объем трубки мал, поэтому концентрации в сосудах постоянны по всему объему и надо исследовать их зависимости от времени $n_1(t)$ и $n_2(t)$.

Т.к. в трубке устанавливается стационарный поток, закон Фика для нее выглядит так:

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

Δn — разность концентраций гелия на концах трубки.

$N_1 = n_1 V$ и $N_2 = n_2 V$ — количества частиц примеси в сосудах.

$$\frac{dN_1}{dt} = -\frac{dN_2}{dt}$$

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

$\tau = VL/2DS$ — характерное время диффузии.

$$\Delta n = \Delta n_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

$\tau \gg L^2/2D$, поэтому процесс можно считать квазистационарным.

Влиянием сил тяжести можно пренебречь, т.к. $mgh \ll k_B T$.

2 Оборудование

Для измерения концентрации используются датчики теплопроводности. При этом используется, что теплопроводность κ смеси зависит от ее состава:

$$\Delta\kappa \approx C\Delta n$$

Сами датчики теплопроводности устроены следующим образом. Тонкая платиновая проволока, протянутая вдоль оси стеклянного цилиндра, нагревается током. Внутренняя полость датчика сообщается с объёмом камеры через отверстия, размеры которых таковы, что скорость диффузии из объёма сосуда в полость датчика значительно больше скорости диффузии из одного объёма в другой. Таким образом, состав газа в датчике практически совпадает с составом газа в объёме. Тепло от проволоки к стенке цилиндра передаётся главным образом за счёт теплопроводности газа, находящегося внутри цилиндра. При заданной мощности нагревания приращение температуры проволоки 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.

$$U \propto \Delta\kappa \propto \Delta n$$

$$U = U_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

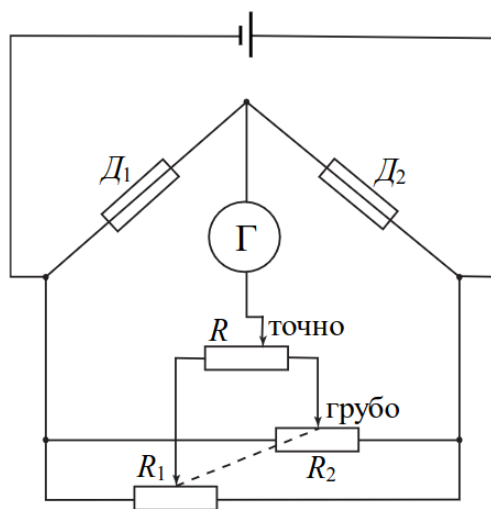
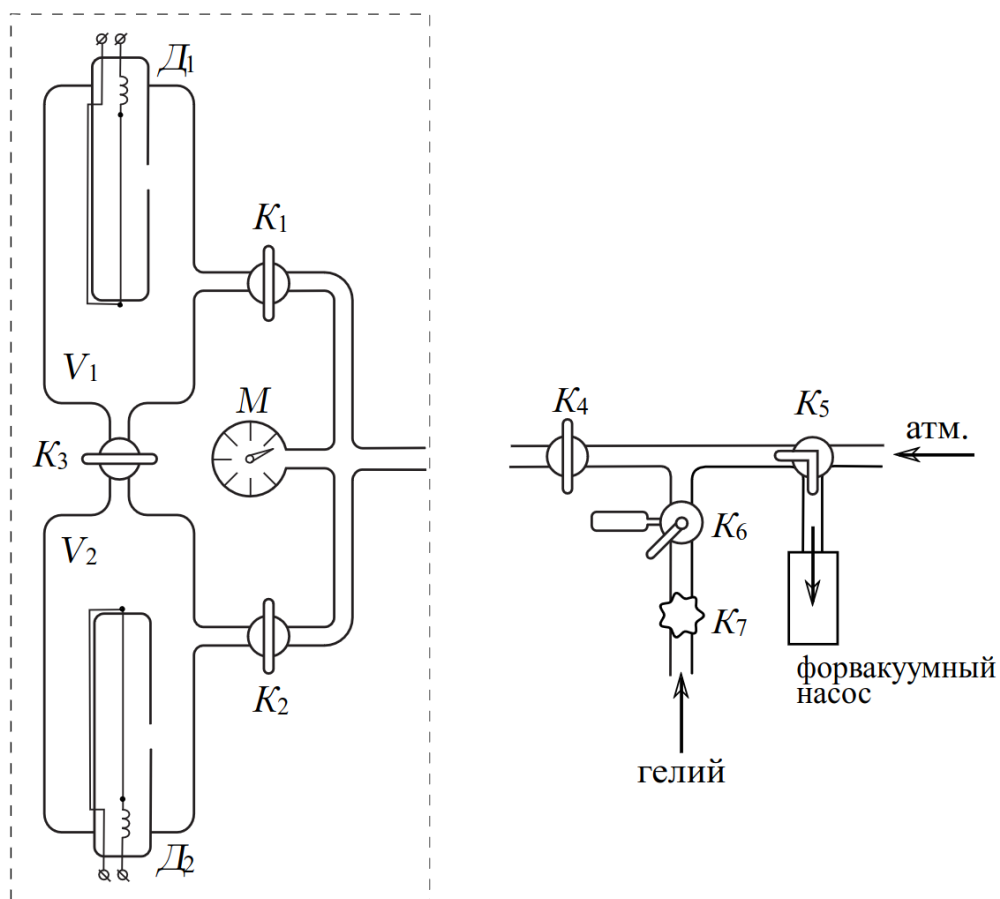
Измеряя $U(t)$, можно получить τ , а из него — коэффициент диффузии.

Схема установки приведена на рисунке. Для откачки используется форвакуумный насос.

Измерительная часть состоит из сосудов V_2 и V_1 , для их накачки служат краны К1 и К2. Кран К3 открывается для начала диффузии. Для накачки гелия используются краны К6 и К7.

Датчики теплопроводности Д1 и Д2 расположены в сосудах и включены в мостовую схему.

В одну из диагоналей моста включён высокочувствительный вольтметр (гальванометр) Г, 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 Г на нуль (балансировка моста). Сопротивления R_1 и R_2 спарены (их подвижные контакты находятся на общей оси) и изменяются одновременно при повороте ручки грубой регулировки. Точная балансировка выполняется потенциометром R . Балансировку необходимо проводить перед каждым экспериментом заново: при этом установка заполняется чистым газом (воздухом без гелия) при давлении, близком «рабочему» (при котором затем будут проводиться измерения).



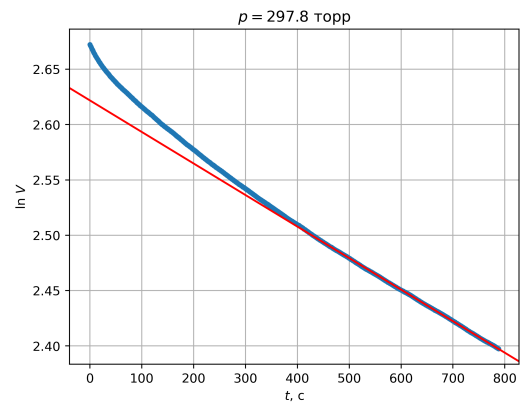
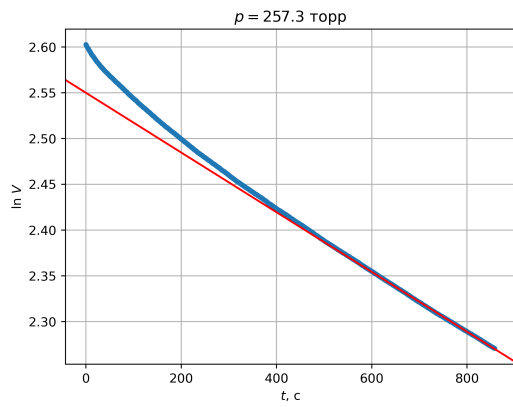
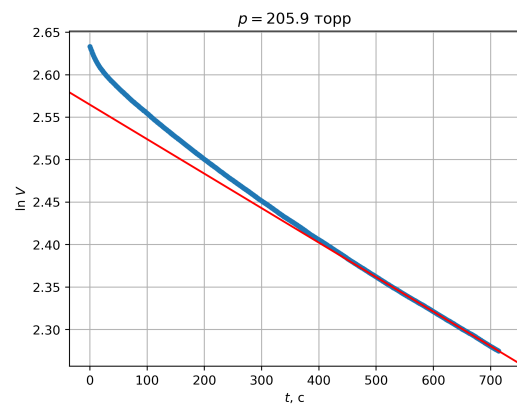
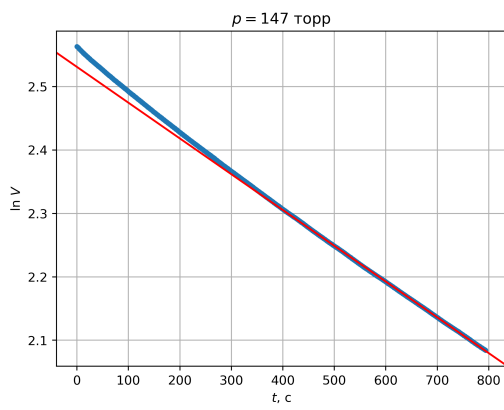
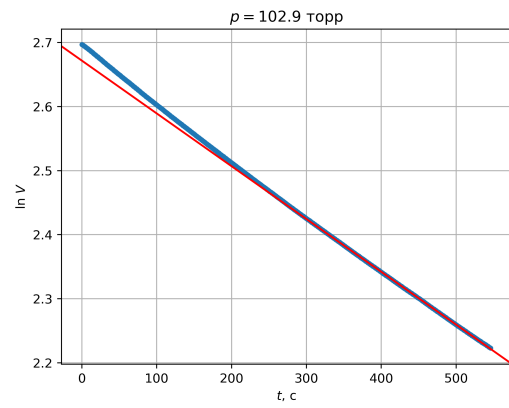
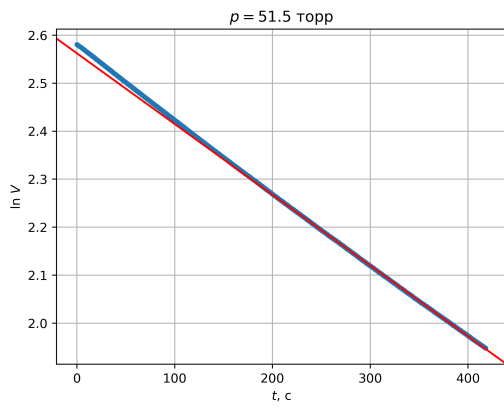
3 Результаты измерений

$$V = 800 \pm 5 \text{ см}^3$$

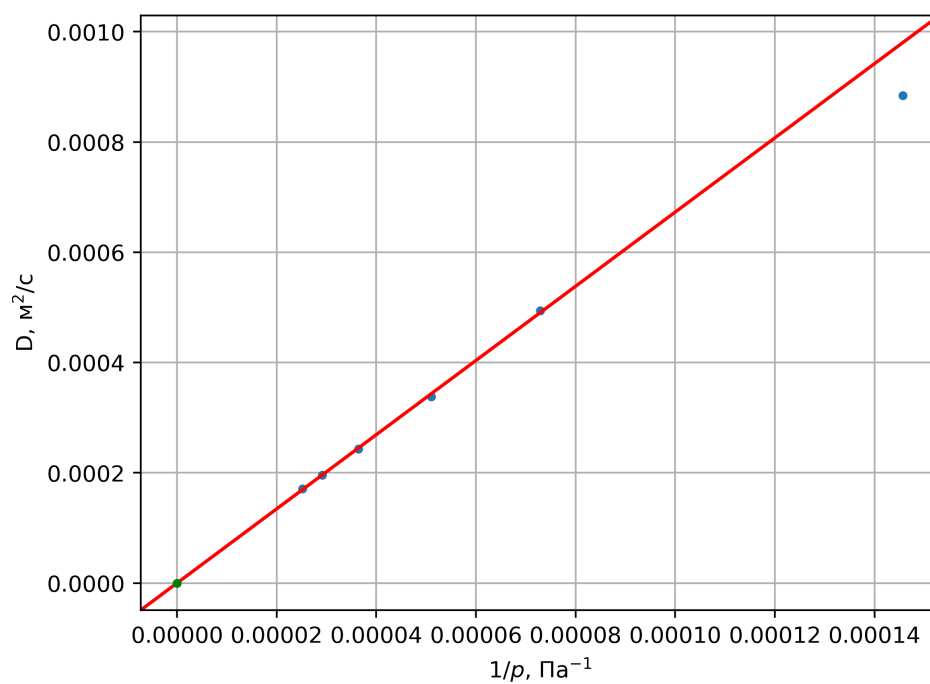
$$l/S = 1500 \pm 100 \text{ см}^{-1}$$

$$k = 6,73 \pm 0,03 \text{ Н/с}$$

$$D_0 = k/101325 \text{ Па} = (6,64 \pm 0,03) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$$



$D, \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$	$8,8 \pm 0,6$	$4,9 \pm 0,4$	$3,4 \pm 0,2$	$2,4 \pm 0,2$	$1,96 \pm 0,14$	$1.71 \pm 0,12$
$p \pm 0,25, \text{ торр}$	51,5	102,9	147	205,9	257,3	297,8



При комнатной температуре

$$\lambda \approx 1 \text{ мкм}$$

$$\sigma \approx 2,5 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$$

4 Вывод

Был исследован процесс диффузии гелия в воздухе и получены значения для коэффициента диффузии при атмосферном давлении, длина свободного пробега и эффективное сечение в условиях эксперимента.