

Лабораторная работа 2.2.1

«Исследование взаимной диффузии газов»

Комкин Михаил, Б01-303

14 мая 2024 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; баллон с газом (гелий); манометр; источник питания; магазин сопротивлений; гальванометр; секундомер.

1 Теоретическая часть

Диффузией называется самопроизвольное перемешивание молекул, происходящее вследствие их хаотичного теплового движения. При перемешивании молекул разного сорта говорят о взаимной (или концентрационной) диффузии. Для наблюдения взаимной диффузии необходимо равенство давлений во всей системе (в противном случае возникнет гораздо более быстрое макроскопическое течение газа как сплошной среды).

В системе, состоящей из двух компонент a и b , плотность потока вещества любого компонента в результате взаимной диффузии определяется законом Фика 1:

$$j_a = D_{ab} \frac{\partial n_a}{\partial x}, \quad j_b = D_{ba} \frac{\partial n_b}{\partial x}, \quad (1)$$

где D_{ab} и $D_{ba} = D$ - коэффициент взаимной диффузии компонент, а $j_{a,b}$ - плотности потока частиц соответствующего сорта

В данной работе исследуется диффузия примеси лёгкого газа (гелия) на фоне воздуха. Концентрация воздуха n , в условиях опыта предполагается значительно большей, чем концентрация примеси n_{He} , и её относительное изменение в результате взаимной диффузии будет незначительным. Поэтому мы будем описывать только диффузию примеси (гелия) на стационарном фоне воздуха и в дальнейшем, если не оговорено особо, под n будем иметь в виду концентрацию примеси n_{He} .

Для исследования взаимной диффузии газов и определения коэффициента диффузии используется установка, изображённая на рис. 1. Два сосуда с объёмами 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.

Рассмотрим процесс выравнивания концентрации. В общем случае концентрация зависит

от координат и времени во всей установке. В наших условиях решение задачи упрощается, поскольку объём соединительной трубки мал по сравнению с объёмами сосудов. В связи этим концентрацию газов внутри каждого сосуда можно считать постоянной по всему объёму сосуда, и предположить, что процесс выравнивания концентраций происходит в основном благодаря диффузии в трубке.

Если бы концентрации в сосудах V_1 и V_2 поддерживались постоянными и равными n_1 и n_2 , то в трубке установился бы стационарный поток частиц $J = -DS \frac{\partial n}{\partial x}$, одинаковый в каждом сечении трубки. Следовательно $n(x)$ была бы линейной функцией координаты и $dn/dx = \Delta n/l$, где l - длина трубки, откуда получаем

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

Предположим, что процесс выравнивания концентраций в сосудах происходит достаточно медленно, так что все время успеет установиться стационарный профиль концентраций и в каждый момент времени справедливо соотношение 2. Исходя из этого получим зависимость концентраций в каждом сосуда n_1 и n_2 от времени.

Обозначим через Δn_1 и Δn_2 изменения концентраций в объемах V_1 и V_2 за время Δt . Тогда $V_1 \Delta n_1$ равно изменению количества компонента в объеме V_1 , а $V_1 \Delta n_1$ - изменению количества компонента в объеме V_2 . Из закона сохранения вещества следует, что $V_1 n_1 + V_2 n_2 = const$, откуда $V_1 \Delta n_1 = -V_2 \Delta n_2$ Эти изменения происходят вследствие диффузии, поэтому

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

Преобразовав это равенство и введя новую переменную $\Delta n = n_1 - n_2$, затем проинтегрировав, получим:

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-t/\tau}, \quad (4)$$

Δn_0 - разность концентраций примеси в начальный момент времени,

$$\tau = \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \frac{l}{SD} \quad (5)$$

2 Экспериментальная установка

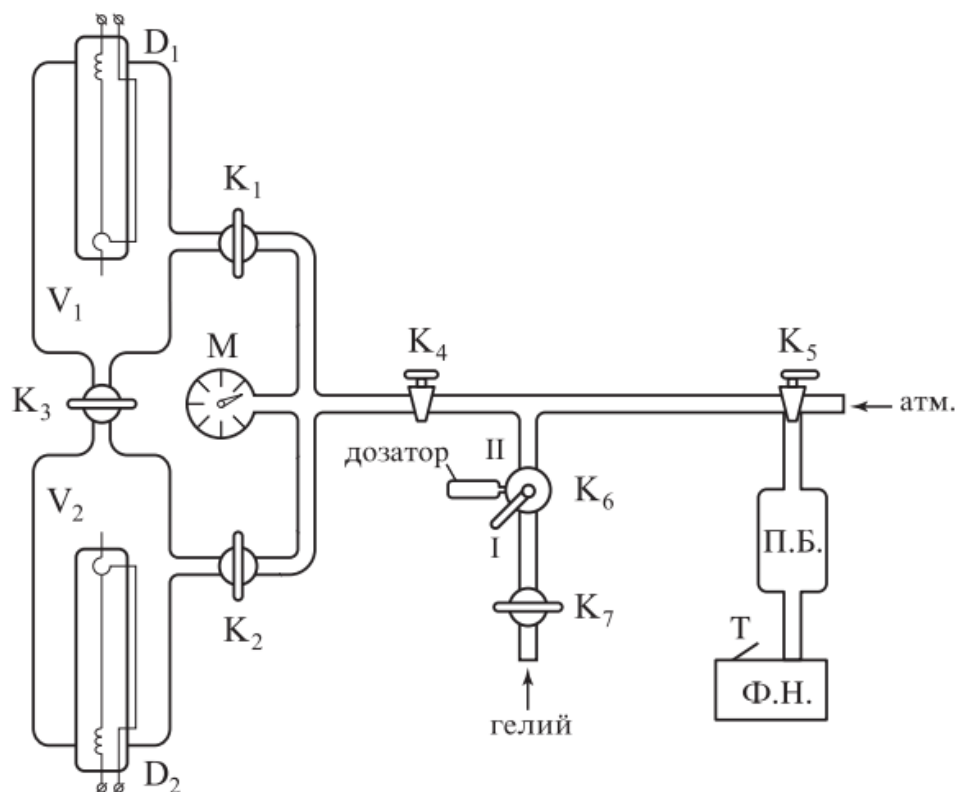


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Общий вид конструкции установки приведён на 1.

Установка состоит из двух сосудов V_1 и V_2 , соединённых краном K_3 , форвакуумного насоса Ф.Н. с выключателем, манометра и системы напуска гелия, включающей в себя краны 6 и 7. Кран 5 позволяет соединять форвакуумный насос либо с установкой, либо с атмосферой. Между форвакуумным насосом и краном 5 вставлен предохранительный баллон П.Б., защищающий кран 5 и установку при неправильной эксплуатации её от попадания форвакуумного масла из насоса Ф.Н. Сосуды V_1 и V_2 и порознь и вместе можно соединять как с системой запуска гелия, так и с форвакуумным насосом. Для этого служат краны K_1 , K_2 , 4 и K_5 . Манометр М регистрирует давление газа, до которого заполняют тот или другой сосуды. Давление гелия в трубопроводе больше атмосферного. Это необходимо для того, чтобы из-за возможных неплотностей в трубопроводе гелий оставался бы в нём без примесей воздуха. А система напуска гелия, особенно многоходовой кран 6, как правило, имеет утечки. Для сохранения гелия, а также для уменьшения неконтролируемого попадания гелия в установку (по протечкам в кране 6) между трубопроводом подачи гелия и краном 6 поставлен металлический кран 7. Его открывают только на время непосредственного заполнения установки гелием. Все остальное время он закрыт.

В силу того, что в сосуд требуется подавать малое давление гелия, между кранами 7 и 4 стоит кран 6, снабженный дозатором. Дозатор - это маленький объём, который заполняют до

давления гелия в трубопроводе, а затем уже эту порцию гелия с помощью крана 6 впускают в установку.

Кран 4 обладает повышенной вакуумоплотностью. Как отмечалось выше, кран 6 такой плотностью не обладает. Поэтому после заполнения сосудов V_1 и V_2 рабочей смесью кран 4 надо обязательно закрыть, чтобы в рабочей части установки давление в процессе измерений сохранялось постоянным.

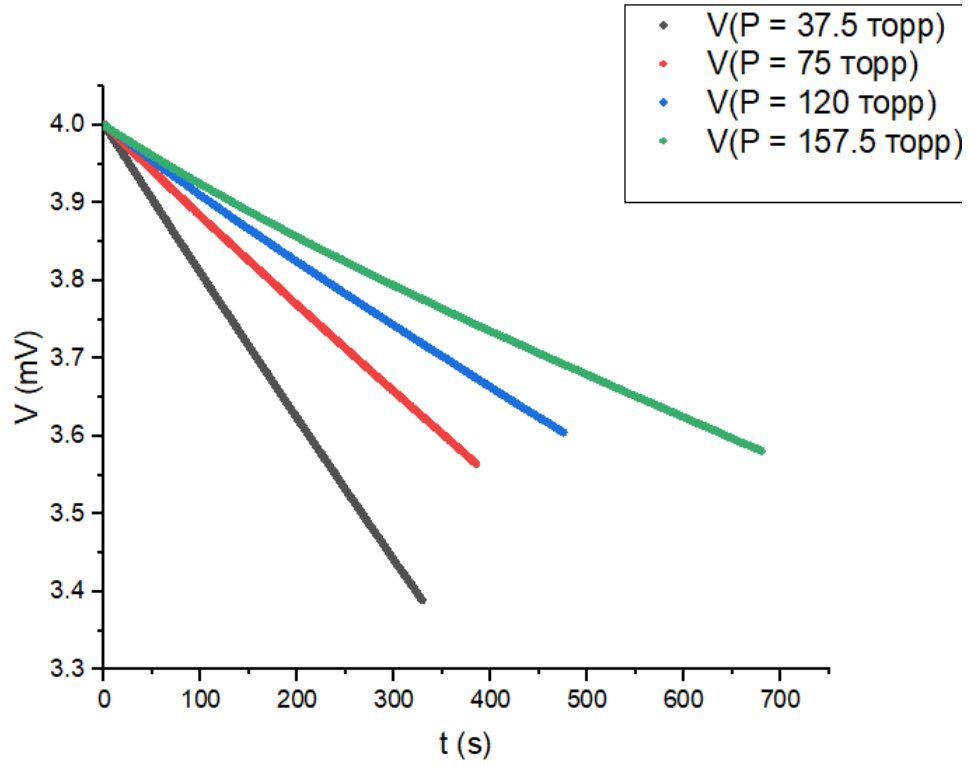
3 Ход работы

1. Включите питание электрической схемы установки рубильником (рис. 2). Откройте краны К1, К2, К3 (рис. 1).
2. Очистите установку от всех газов, которые в ней есть. Для этого откройте кран К4. Включите форвакуумный насос (Ф.Н.) выключателем Т, находящемся на насосе, и соедините насос с установкой, повернув ручку крана К5 длинным концом рукоятки влево (на установку). Откачайте установку до давления 0,1 торр, что достигается непрерывной работой насоса в течение 3-5 минут. Для прекращения откачки ручку крана К5 поставьте длинным концом вверх. Если при этом выключите и форвакуумный насос, то ручку крана К5 необходимо повернуть вправо, чтобы полость форвакуумного насоса была соединена с атмосферой. В противном случае масло, находящееся в форвакуумном насосе, может быть выдавлено из него и попасть в установку, что недопустимо.
3. Затем в установку нужно напустить воздух до рабочего давления (вначале Р 40 торр), чтобы сбалансировать мост на рабочем давлении. Для этого (если насос выключен) рукоятку крана К5 повернуть из положения вправо (воздух поступает в насос) в положение влево (воздух из насоса поступает в установку). Эту операцию надо повторить несколько раз, пока не будет достигнуто нужное давление. Если окажется, что воздуха напустили слишком много, излишки его откачать тем же насосом. Сбалансируйте мост. Балансировку моста начинайте при сопротивлении магазина сопротивлений $M_r 10^\circ$ Ом, добиваясь нулевых показаний гальванометра Г вначале с помощью ручки «грубо» (рис. 2), постепенно уменьшая сопротивление магазина до 0, а затем с помощью ручки «точно». Окончательный баланс моста проводите на диапазоне измерений гальванометра 1 мкА. Когда баланс достигнут, переключатели моста установить на максимум. Это необходимо сделать для того, чтобы в процессе последующих действий не сжечь гальванометр. Диапазон измерений самого гальванометра переведите на 10 мкА.
4. Заполните установку рабочей смесью: в сосуде V_2 должен быть воздух, а в сосуде V_1 - смесь воздуха, с гелием. Заполнение производится в следующем порядке: а) Откачайте установку до 0,1 торр. б) Закройте краны К2 и К3, убедитесь в том, что краны К1 и К4 открыты. в) Заполните объём V_1 гелием до давления 0,1 Рабочее: т. е. 4 торр. Давление гелия в трубопроводе немного выше атмосферного и, следовательно, много больше требуемых 4 торр. Поэтому соединять напрямую полость установки с трубопроводом гелия нельзя. Гелием наполняют сначала дозатор (маленький объём), а уже потом (рис. 3) дозатор соединяют с полостью установки. Эту операцию проводят с помощью крана К6, поворачивая его рукоятку из положения I в положение II и обратно до тех пор, пока не будет достигнуто нужное давление. Если давление гелия оказалось слишком

большим, его излишки можно откачать насосом. Гелий можно откачать и весь, а затем вновь заполнить до нужного давления. Такая операция повысит надёжность того, что напущен чистый гелий, а не его смесь с воздухом. После заполнения ёмкости V1 гелием кран K1 необходимо закрыть, а из патрубков установки откачать оставшийся гелий до 0,1 торр. в) Откройте кран K2 и с помощью крана K5 заполните объём V3 воздухом до давления 1,5 P_{рабочее}. После этого закройте кран K1. Это необходимо сделать потому, что его герметичность выше, чем у остальных соединений справа от него, и особенно у крана Kв. г) Уравняйте давление в объёмах V1 и V2, открыв кран K1 при уже открытом кране K2 (кран K3 открывать пока нельзя). Не торопитесь закрывать краны K1 и K2 хотя бы потому, что в одном сосуде происходит адиабатическое сжатие, а в другом разрежение. Поэтому температура газов в одном сосуде будет повышаться, а в другом понижаться. Необходимо, чтобы исходное состояние было изотермическим. Пока идёт выравнивание давлений и температур, подготовьте измерительную схему к работе. Для этого, постепенно уменьшая величину сопротивления R_г, добейтесь такого состояния, чтобы стрелка гальванометра показывала 95 делений от всей шкалы. Если и при R_г = 0 отклонение стрелки гальванометра мало, увеличьте чувствительность шкалы гальванометра, переключая последовательно с 10 мкА до 5 мкА или 1 мкА. Если у вас на эту процедуру уходит времени больше, чем 1-2 минуты, то прежде чем продолжать её дальше, закройте краны K1 и K3. Затем закончите работу с гальванометром.

5. Приступите к измерениям. Откройте кран K3, включите кундомер и отмечайте, как изменяются показания гальванометра с течением времени. Процесс измерений продолжайте до тех пор, пока разность концентраций (показания гальванометра) не упадёт на 30-50 (при этом должно быть снято не менее 10 точек). Продолжайте аналогичные измерения (пп. 3-6) при различных значениях давления.
6. Внесем полученные данные в таблицу. Здесь ее проводить не будем, так как потребуется слишком много места.
7. Убедитесь, что процесс диффузии подчиняется закону (6). С этой целью для каждого из давлений постройте графики, откладывая по оси абсцисс время, а по оси ординат - логарифм от показаний гальванометра. Графики должны иметь вид прямых линий. По угловым коэффициентам экспериментальных прямых и известным параметрам установки рассчитайте коэффициенты взаимной диффузии при выбранных вами давлениях.

Рис. 2: График зависимости $V(t)$



P , торр	σ_P , торр	$B \cdot 10^{-3}$, c^{-1}	$\sigma_B \cdot 10^{-3}$, c^{-1}	τ , с	σ_τ , с
37.5	1,9	-18.62	0.01	53.7	0,1
75	1,9	-11.34	0.01	88.2	0,1
120	1,9	-8.29	0,09	120.3	0,2
157.5	1,9	-6.05	0,02	165.3	0,4

Таблица 1: Аппроксимация зависимостей

8. Рассчитаем коэффициент диффузии по формуле

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

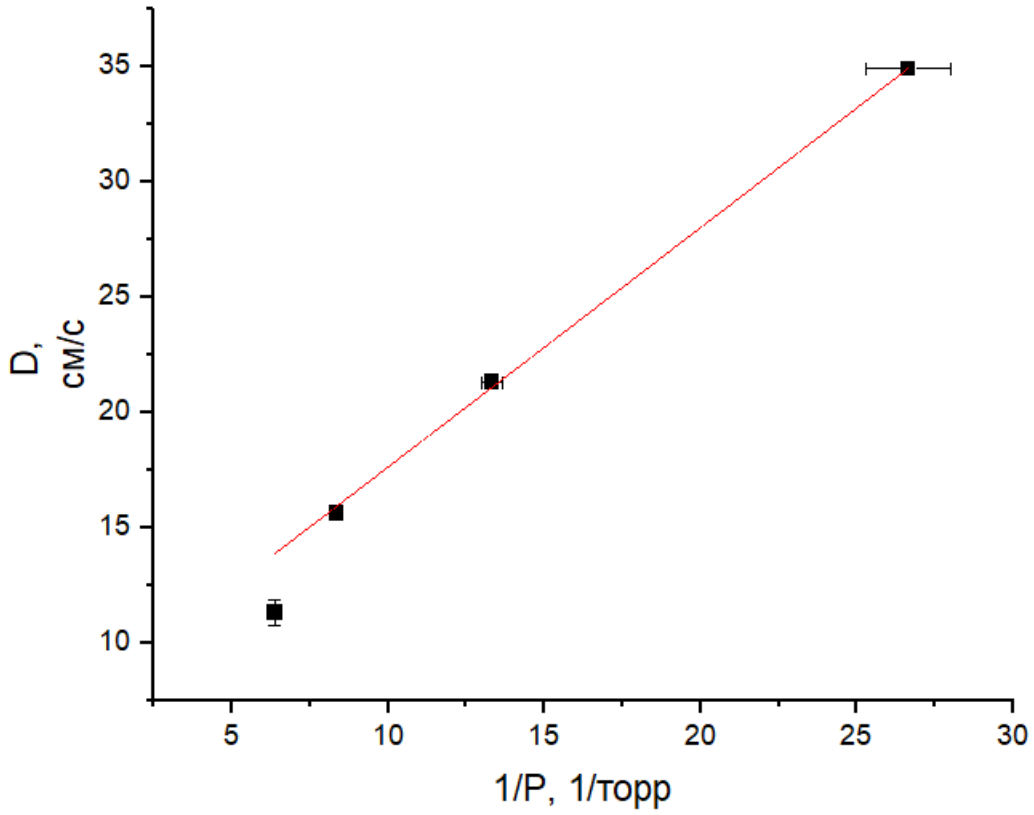
Для этого запишем геометрические параметры установки. $V_1 = (800 \pm 5) \text{ см}^3$, $V_2 = (800 \pm 5) \text{ см}^3$, $L/S = (15.0 \pm 0.1) \frac{1}{\text{см}}$ При этом погрешность

$$\sigma_\tau = \tau \cdot \frac{\sigma_B}{|B|}.$$

P , торр	σ_P , торр	D , $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	σ_D , $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$
26.6	1.35	34.9	0.03
13.3	0.34	21.3	0.08
8.3	0.13	15.6	0.14
6.4	0.07	11.3	0.54

Таблица 2: Результаты вычислений D

Рис. 3: Зависимость коэффициента диффузии от давления в координатах $D, 1/$



9. Построим график зависимости коэффициента диффузии от давления в координатах $D, 1/$. Рассчитаем величину коэффициента диффузии при атмосферном давлении.

$$k = (437.36 \pm 21.01) \frac{\text{см}^2}{\text{с}^* \text{торр}}$$

и

$$D_{\text{атм}} = (0.55 \pm 0.03) \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$$

10. Посчитаем длину свободного пробега гелия в данных условиях:

$$\sigma_{\lambda_{\text{He}}} = \lambda_{\text{He}} \cdot \frac{\sigma_D}{D} \quad (6)$$

$$\lambda_{\text{He}} = \frac{3D}{\bar{v}} = \frac{3D}{\sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}} = (1.2 \pm 0.12) \cdot 10^{-7} \text{ м} \quad (7)$$

Из выражения для длины свободного пробега можно найти эффективное сечение столкновений атомов гелия с молекулами воздуха:

$$\sigma_{\sigma} = \sigma \sqrt{\left(\frac{\sigma_p}{p}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\lambda}}{\lambda}\right)^2} \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{1}{n_0 \lambda} = \frac{kT}{p \lambda} = (3.4 \pm 0.3) \cdot 10^{-19} \text{ м}^2 \quad (9)$$

Основной вклад в данную погрешность дает неточность измерения давления.

4 Вывод

Получено значение коэффициента взаимной диффузии гелия и воздуха при разных пропорциях, видна идентичность полученных результатов при разных пропорциях газов и при сравнении с табличными значениями.