

Лабораторная работа

Определение коэффициента диффузии гелия через резиновую оболочку воздушного шарика

Цель работы:

Знакомство с явлениями переноса. Определение коэффициента диффузии гелия через резиновую оболочку воздушного шарика.

В работе используются:

Два одинаковых резиновых шарика шарообразной формы, один из которых накачан гелием, весы (требуемая точность $\pm 0,01$ г), секундомер, небольшой груз (гайка), нитка, ножницы, бумажный метр, миллиметровая бумага.

Примечание: в последнее время гелиевые шарики обрабатывают специальным составом для замедления диффузии гелия. Такой шарик для опытов не годится. Для эксперимента требуется обычный, не обработанный составом шарик.

Воздушный шарик, накачанный гелием, со временем достаточно быстро сдувается. Это связано с диффузией гелия через резиновую оболочку шарика. Плотность потока гелия j (число молекул, проникающих через единичную площадку резины в единицу времени) определяется законом Фика:

$$j = D \Delta n / \delta,$$

где D - коэффициент диффузии гелия через резину, δ - толщина резиновой оболочки накаченного шарика, $\Delta n = n - n_0$ - разность концентраций гелия внутри n и вне шарика n_0 .

За время t через всю поверхность резиновой оболочки шарика S в атмосферу выйдет:

$$\Delta N = jSt = \frac{DSnt}{\delta} = \frac{DSnt}{\delta V}$$

молекул гелия (внутри шарика концентрация $n = N/V$, вне шарика концентрацию гелия считаем равной нулю $n_0 = 0$). (В приведённой формуле S считается константой, хотя в течение опыта, естественно, происходит уменьшение поверхности шарика. Вам следует экспериментально оценить уменьшение S за время измерения и при необходимости учесть это при оценке погрешности измерений).

Пренебрегая утечкой газа через узел, а также проникновением молекул воздуха внутрь шарика и, т.е., предполагая, что оболочка шарика проницаема только для гелия, получим, что относительное изменение величины подъёмной силы шарика $F_{\Pi} = (\rho_0 - \rho_{He})Vg$ за время t равно:

$$\frac{\Delta F_{\Pi}}{F_{\Pi}} = \frac{\Delta V}{V} = -\frac{\Delta N}{N} = -\frac{DSt}{\delta V}$$

откуда:

$$\Delta F_{\Pi} = -\frac{DSF_{\Pi}t}{\delta V} = -\frac{DS(\rho_0 - \rho_{He})gt}{\delta}$$

Эта формула даёт закон изменения подъёмной силы с течением времени:

$$F_{\Pi}(t) = F_0 - DS(\rho_0 - \rho_{He})gt/\delta.$$

В приведённых выше формулах ρ_0 - плотность окружающего шарик воздуха, ρ_{He} - плотность гелия в шарике. При этом мы считали, что давление гелия внутри шарика незначительно превосходит атмосферное (реально, для шаров шарообразной формы давление в шарике превосходит атмосферное на $\sim 5\%$).

Методика измерений

Привяжем к нити гелиевого шарика груз и положим груз на весы как показано на рисунке. Сила тяжести груза превышает подъёмную силу шарика. Сила, действующая на платформу весов, равна:

$$F = m_{\text{гр}}g - F_{\text{п}},$$

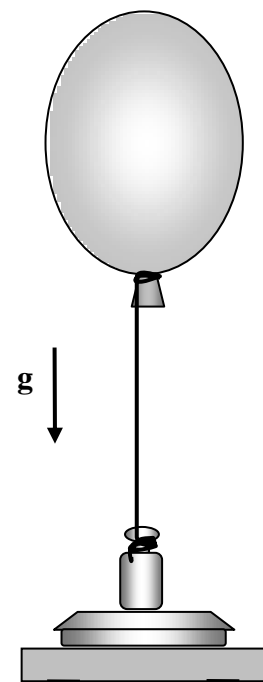
где $m_{\text{гр}}$ – суммарная масса груза и оболочки с ниткой.

Поскольку с течением времени подъёмная сила уменьшается линейно, то показания весов, начиная с некоторого начального значения m_0 , увеличиваются по линейному закону:

$$m(t) = \frac{F}{g} = m_{\text{гр}} - \frac{F_0}{g} + \frac{DS(\rho_0 - \rho_{\text{He}})t}{\delta} = m_0 + \frac{DS(\rho_0 - \rho_{\text{He}})t}{\delta} = m_0 + \beta t.$$

Таким образом, коэффициент диффузии D можно определить по значению углового коэффициента β графика экспериментальной зависимости $m(t)$ по формуле:

$$D = \beta\delta/S(\rho_0 - \rho_{\text{He}}) \quad (1)$$



Задание

1. С помощью бумажного метра проведите измерения, необходимые для определения полной поверхности S накачанного гелием шарика. (Измерения, которые необходимо произвести в этом пункте определяются особенностями формы шарика)
2. Привяжите к нитке шарика небольшой груз (гайку) и положите гайку на весы (см. рис.) Снимите зависимость $m(t)$ показаний весов от времени. Измерения следует проводить в течении времени порядка одного часа.
3. По окончании измерения зависимости $m(t)$ проведите измерения, необходимые для определения относительного изменения поверхности шарика S за время опыта. Убедитесь в том, что это изменение не превышает нескольких процентов. Учтите результаты этих измерений при оценке погрешности окончательного результата.
4. Взвесьте на весах ненакачанный шарик, предварительно отрезав от него область утолщённой резины в области отверстия, через которую шарик надувается. Зная массу шарика и плотность резины $\rho_{\text{рез}} = 1,05 \text{ г/см}^3$, рассчитайте толщину резиновой оболочки δ накачанного шарика. При этом считайте, что коэффициент Пуассона резины $\mu = 0,5$.
5. Зная температуру и атмосферное давление в аудитории, рассчитайте плотность воздуха ρ_0 и гелия ρ_{He} в шарике.
6. Постройте график зависимости $m(t)$. По угловому коэффициенту β наилучшей прямой, проведённой через экспериментальные точки, по формуле (2) определите коэффициент диффузии гелия через резину.
7. Оцените погрешность результата.
8. Предложите эксперимент, позволяющий оценить диффузию воздуха внутрь шарика. Проведите необходимые измерения. По результатам измерений сделайте вывод об обоснованности наших предположений о пренебрежении диффузией воздуха через резину.

Контрольные вопросы

1. Запишите закон Фика для трёхмерного случая.
2. Оцените коэффициент диффузии гелия в воздухе при нормальных условиях.

3. Исследуется диффузия золота в свинец при температуре 160°C . Наблюдения показывают, что за 25 дней атомы золота проникают в свинец в среднем на 4,5 мм. Вычислить коэффициент диффузии (ответ: $D = \frac{x^2}{2t} = 4,7 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$).
4. При диффузии золота в жидкий свинец при 500 К коэффициент диффузии $D = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$. На какую среднюю глубину продиффундируют в свинец атомы золота за сутки? (Ответ: 2,5 см)
5. Для чего в п.4 задания приводится значение коэффициента Пуассона резины?

Список литературы

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. - М.: Наука, 1990. §§ 90, 93
2. Коротков П. Ф. Молекулярная физика и термодинамика. – М.: МФТИ, 2009. С. 74 – 98.