

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.4**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ ГАЗА ПРИ РАЗЛИЧНОМ ДАВЛЕНИИ

Цель работы: экспериментальное определение коэффициента диффузии водяных паров в воздухе.

Приборы и принадлежности: прибор для определения коэффициента диффузии, окулярный микрометр, линза, насос Комовского, стрелочный вакуумметр, шприц с водой, секундомер.

ВВЕДЕНИЕ

Диффузией называется явление проникновения двух соприкасающихся веществ друг в друга. В данной работе определяют коэффициент диффузии водяных паров в воздухе при испарении капли воды и спирта, считая диффузию стационарной.

Масса пара dm , диффундировавшего через площадку dS за время dt , определяется уравнением Фика:

$$dm = -D \frac{\partial \rho}{\partial r} \cdot dS dt, \quad (1)$$

где $\frac{\partial \rho}{\partial r}$ – градиент плотности насыщенного водяного пара, D – коэффициент диффузии.

В стационарных условиях поток массы через полусферу произвольного радиуса r постоянен и равен

$$dm = -D \frac{\partial \rho}{\partial r} \cdot dS dt. \quad (2)$$

Отсюда следует, что

$$r^2 \frac{\partial \rho}{\partial r} = C_1 = const. \quad (3)$$

Из (3) можно найти градиент плотности пара:

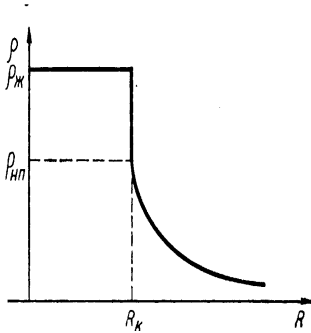
$$\frac{\partial \rho}{\partial r} = \frac{C_1}{r^2}. \quad (4)$$

Подставив (4) в уравнение диффузии (1), получим:

$$dm = -D \cdot dS \cdot dt \frac{C_1}{r^2}. \quad (5)$$

Для определения постоянной C_1 запишем закон изменения плотности ρ паров от расстояния r . Интегрируя (4), получаем:

$$\rho(r) = \int \frac{C_1}{r^2} dr + C_2 = -\frac{C_1}{r} + C_2. \quad (6)$$



Постоянную C_2 найдем из краевых условий задачи. Внутри капли плотность воды не изменяется с изменением r . На расстояниях $r \gg R$, где R — радиус капли, плотность паров убывает согласно уравнению (6) (график изменения плотности изображен на рис. 1),

причем при $r \rightarrow \infty$ $\rho \rightarrow f\rho_{н.п.}$, где f — относительная влажность воздуха, $\rho_{н.п.}$ — плотность насыщенных паров. Отсюда $C_2 = f\rho_{н.п.}$. В то же время при $r = R$ плотность пара $\rho = \rho_{н.п.}$. Следовательно, $C_1 = -\rho_{н.п.}(1-f)R$, и в результате

$$\rho = \rho_{н.п.}(1-f)\frac{R}{r} + f\rho_{н.п.}; \quad \frac{\partial \rho}{\partial r} = -\frac{\rho_{н.п.}(1-f)R}{r^2}. \quad (7)$$

Подставляя это значение градиента плотности в (1), получаем:

$$dm = D \cdot dS \cdot dt \frac{\rho_{н.п.}(1-f)R}{r^2}. \quad (8)$$

Если условия опыта стационарны, то масса паров, диффундировавших за время dt через сферическую поверхность с радиусом r , равна:

$$dm = D \cdot 4\pi r^2 \frac{\rho_{н.п.}(1-f)R}{r^2} dt = D \cdot 2\pi\rho_{н.п.}(1-f)Rdt. \quad (9)$$

В то же время при уменьшении радиуса сферической капли от R до $(R-dR)$ изменение её массы dm_k будет равно:

$$dm_k = \rho_{ж} 4\pi R^2 dR, \quad (10)$$

где $\rho_{ж}$ — плотность жидкости.

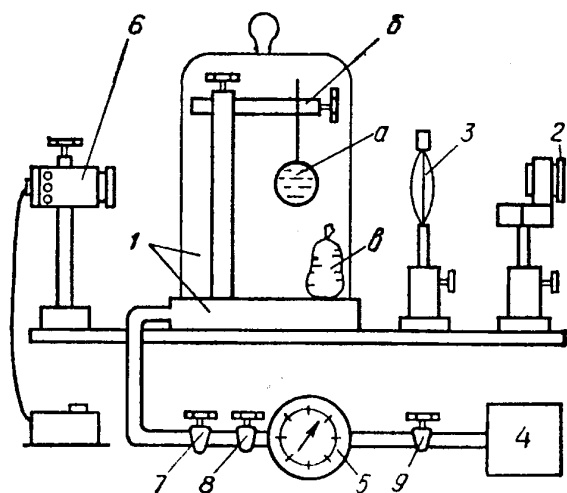
Учитывая, что убыль массы капли равна массе диффундировавшего пара: $dm_k = -dm$, с помощью уравнений (9) и (10) можно связать коэффициент диффузии D со скоростью изменения радиуса капли R :

$$D = -\frac{\rho_{ж}}{\rho_{н.н.}(1-f)} \cdot R \frac{dR}{dt} = \frac{\rho_{ж}}{2\rho_{н.н.}(1-f)} \cdot \left| \frac{d(R^2)}{dt} \right|. \quad (11)$$

Из полученного выражения ясно, что для экспериментального определения D необходимо измерить изменение радиуса капли со временем при стационарных условиях.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка (рис. 2) состоит из стеклянного колокола с



вакуумной тарелкой 1, окулярного микрометра 2, линзы 3, насоса 4, вакуумметра 5, осветителя 6, трехходового крана 7 и двухходовых кранов 8 и 9.

Под колпаком помещается исследуемая капля жидкости a и поглотитель b . Капля размещается в колечке, прикрепленном к держателю b . Давление воздуха под колпаком можно изменять с помощью крана 7 и насоса.

Для измерения диаметра капли служит оптическая система, состоящая из линзы 3 и окулярного микрометра 2. Отсчет времени производится по часам.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Задание 1. Подготовка установки к работе.

Снимите стеклянный колокол. С помощью шприца подвесьте каплю к держателю. Добейтесь отчетливого изображения капли в окулярном микрометре.

Задание 2. Измерение диаметра испаряющейся капли.

Измерьте расстояние a от держателя капли до линзы линейкой. С помощью формулы линзы вычислите расстояние от линзы до действительного изображения капли и увеличение, даваемое линзой. Фокусное расстояние линзы F примите равным 11 см.

При атмосферном давлении измерьте диаметр d изображения капли с помощью окулярного микрометра и включите секундомер. Измеряйте диаметр d через равные последовательные промежутки времени. Сделайте 3–5 измерений. При атмосферном давлении измерения радиуса капли проводите через 7–10 мин.

Повторите измерения при другом давлении. Для этого подвесьте новую каплю воды и закройте ее колоколом, плотно притерев его к поверхности тарелки. Включите насос и откачайте воздух до 0,5 атм. Вновь сделайте 3–5 измерений радиуса испаряющейся капли с интервалом 3–5 мин. Повторите эксперимент при давлении 0,25 атм.

Зафиксируйте в протоколе температуру в помещении и относительную влажность воздуха f (она измеряется гигрометром). По таблице 1, прилагающейся к работе, определите плотность насыщенного пара $\rho_{н.п.}$ при данной температуре. Результаты всех измерений внесите в таблицу:

№	d , мкм	R , мкм	R^2 , м ²	t , с	Расстояние a = см Увеличение Γ = Температура: °С Относит. влажность f = % $\rho_{н.п.}$ = кг/м ³
$P = 1$ атм					
1					
2					
...					
$P = 0,5$ атм					
1					
2					

...					
-----	--	--	--	--	--

Задание 3. Расчет коэффициентов диффузии при различном давлении.

Для каждой серии измерений постройте график, откладывая по оси абсцисс время t , а по оси ординат – квадрат радиуса капли R^2 . Согласно формуле (11), зависимость $R^2(t)$ должна быть линейная. Пользуясь графиком, определите значение производной $\frac{d(R^2)}{dt}$ и ее погрешность. Рассчитайте коэффициент диффузии по формуле (11) при различных значениях давления.

Задание 4. Оценка длины свободного пробега молекул пара.

Зная комнатную температуру, вычислите среднюю скорость молекул водяного пара по формуле $\bar{v} = \sqrt{\frac{8}{\pi} \cdot \frac{RT}{M}}$, где R – молярная газовая постоянная, M – молярная масса. Из формулы $D = \frac{1}{3} \bar{v} \lambda$ найдите длину свободного пробега λ молекул водяного пара и спирта в воздухе для полученных значений коэффициента D .

При расчетах для плотности жидкости примите $\rho_{ж} = 10^3 \text{ кг/м}^3$.

СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

1. Плотность ρ насыщенного водяного пара при различных температурах

температура, °С	$\rho_{н.п.}, \text{ г/м}^3$	температура, °С	$\rho_{н.п.}, \text{ г/м}^3$	температура, °С	$\rho_{н.п.}, \text{ г/м}^3$
13	11,4	17	14,5	21	18,3
14	12,1	18	15,4	22	19,4
15	12,8	19	16,3	23	20,6
16	13,6	20	17,3	24	21,8

2. Коэффициент диффузии D (при атмосферном давлении)

Диффундирующее вещество	Основной компонент	Температура, t °С	Коэффициент диффузии, $m^2/сек$
Пары воды	Воздух	0	$0,23 \cdot 10^{-4}$
Пары этилового спирта	Воздух	0	$0,10 \cdot 10^{-4}$

ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Длина свободного пробега молекул зависит от концентрации газа n и сечения рассеяния $\sigma = \pi d^2$ (d – эффективный диаметр молекул): $\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma}$.
Подумайте, как следует изменить эту формулу, чтобы оценить длину свободного пробега молекул воды в воздухе.
2. Как зависит длина свободного пробега молекул от давления и температуры? При каком давлении средняя длина свободного пробега молекул воздуха равна 1 мм, если при атмосферном давлении она равна $6 \cdot 10^{-6}$ см?
3. Как зависит коэффициент диффузии газа от давления и температуры?
4. Исходя из дифференциального уравнения (11), рассчитайте, за какое время радиус капли уменьшится вдвое.
5. Пользуясь только соображениями размерностей, определите зависимость среднего диффузионного смещения частиц от времени.
6. Если запах пахучего вещества распространяется путем диффузии на расстояние 1 м за время t_1 , то за какое время t_2 он распространится на 10 метров?