

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЗАИМНОЙ ДИФФУЗИИ ВОЗДУХА И ВОДЯНОГО ПАРА

Цель работы – изучение диффузии как одного из явлений переноса; определение коэффициента взаимной диффузии воздуха и водяного пара по скорости испарения жидкости из капилляра.

Теория метода.

Диффузия – это процесс выравнивания концентраций газов, который сопровождается переносом массы соответствующего компонента газа из области с большей в область с меньшей концентрацией. Масса компонента газа, которая переносится вследствие диффузии через поверхность площадью S перпендикулярную к оси Ox , за время t , определяется по закону Фика:

$$M = -D \cdot \frac{d\rho}{dx} \cdot S \cdot t, \quad (4.1)$$

где D – коэффициент диффузии, $\frac{d\rho}{dx}$ – градиент плотности компонента газа.

Для идеального газа

$$D = \frac{1}{3} \cdot \langle \lambda \rangle \cdot \langle v_T \rangle, \quad (4.2)$$

здесь $\langle \lambda \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекулы, $\langle v_T \rangle$ – средняя скорость теплового движения молекул, $\langle v_T \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$.

Рассмотрим частично заполненную водой узкую трубку постоянного сечения S , открытую с одного конца, ось X направим вдоль оси трубки. На границе с водой ($X=0$) парциальное давление водяного пара P_H в трубке равняется давлению насыщенного пара P_H при температуре опыта. Давление водяного пара в трубке изменяется вдоль оси X от значения P_H до давления P , около открытого конца трубки ($X=h$), которое определяется влажностью воздуха в лаборатории, следовательно, вдоль оси трубки существует градиент парциального давления $\frac{dP_H}{dx}$, вследствие чего в ней возникает диффузионный поток M пара, направленный вверх. Плотность пара ρ_H можно выразить через его парциальное давление, используя уравнение состояния идеального газа:

$$\rho_H = \frac{m}{V} = \frac{P_H \mu_H}{RT}. \quad (4.3)$$

Подставляя полученное соотношение (4.3) в формулу закона Фика (4.1), определим массу пара, которая переносится через площадь поперечного сечения трубки за одну секунду:

$$M_H = -D \cdot \frac{d\rho_H}{dx} \cdot S = -\frac{D \mu_H}{RT} \cdot \frac{dP_H}{dx} \cdot S. \quad (4.4)$$

Пренебрегая массой пара, которая переносится конвекционным потоком, который возникает в трубке, массу пара M_H можно выразить через скорость по-

нижения уровня жидкости в капилляре:

$$M_H = \rho_{ж} \cdot S \cdot \frac{\Delta h}{\Delta \tau}, \quad (4.5)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, Δh – понижение уровня жидкости за время $\Delta \tau$.

Подставляя полученное выражение (4.5) в формулу (4.4), получим

$$\rho_{ж} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta \tau} = -\frac{D \mu_H}{RT} \cdot \frac{dP_H}{dx}. \quad (4.6)$$

Разделяя переменные и интегрируя это равенство, получим:

$$\rho_{ж} \cdot R \cdot T \cdot \frac{\Delta h}{\Delta \tau} \cdot \int_0^h dx = -D \cdot \mu_H \cdot \int_{P_H}^{P_1} dP_H$$

или

$$\rho_{ж} \cdot R \cdot T \cdot \frac{\Delta h}{\Delta \tau} \cdot h = D \cdot \mu_H \cdot (P_H - P_1)$$

откуда

$$D = \frac{\rho_{ж} \cdot R \cdot T \cdot h \cdot \frac{\Delta h}{\Delta \tau}}{\mu_H \cdot (P_H - P_1)}, \quad (4.7)$$

где D – коэффициент взаимной диффузии, $\rho_{ж}$ – плотность жидкости (воды); R – универсальная газовая постоянная; $R = 8,31 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$; h – расстояние от поверхности воды до верхнего края трубки; T – температура воды в капилляре и воздуха в лаборатории; Δh – понижение уровня жидкости за время $\Delta \tau$; μ_H – молярная масса воды; P_H – давление насыщенного пара; P_1 – давление пара, которое определяется влажностью воздуха в лаборатории.

Формулу (4.7) можно использовать для экспериментального определения коэффициента взаимной диффузии воздуха и водяного пара, пренебрегая конвекционным потоком пара, который возникает в трубке. При учете конвекционного потока приходим к более точной формуле для определения коэффициента взаимной диффузии:

$$D = \frac{\rho_{ж} \cdot R \cdot T \cdot h \cdot \frac{\Delta h}{\Delta \tau}}{\mu_{ж} \cdot P_0 \cdot \ln \frac{P_0 - P_1}{P_0 - P_H}}, \quad (4.8)$$

где P_0 – атмосферное давление.

Необходимо отметить, что при условии $P_0 \gg P_H$ с равенства (4.8) можно очень просто получить формулу (4.7).

Экспериментальная установка

Для определения коэффициента взаимной диффузии воздуха и водяного пара предназначена экспериментальная установка ФПГТ-4, общий вид которой изображен на рисунке 4.1.

Основным элементом установки является микроскоп 4, на предметном столике которого размещен рабочий элемент, состоящий из измерителя, к подвижной части которого прикреплен корпус из оргстекла. В верхней части корпуса находится стеклянная трубка (капилляр) с дистиллированной водой.

Для подвешивки трубки при измерениях применяется фонарь, свет от которого передается к рабочему элементу по световоду из оргстекла. Яркость свечения лампы устанавливается регулятором "Подсветка капилляра", который находится на передней панели блока приборов 1.

Время испарения воды из капилляра измеряется секундомером, расположенным в блоке приборов, и регистрируется на цифровом индикаторе "Время". Секундомер приводится в действие при включении питания блока приборов. Сброс на нуль значений на индикаторе производится нажатием кнопки "Останов", после отпущения которой снова начинается отсчет времени.

Температура воздуха в блоке рабочего элемента измеряется полупроводниковым термометром и регистрируется на цифровом индикаторе "Температура" блока рабочего устройства.

Цена деления α окулярной шкалы микроскопа указана на шкале микроскопа.

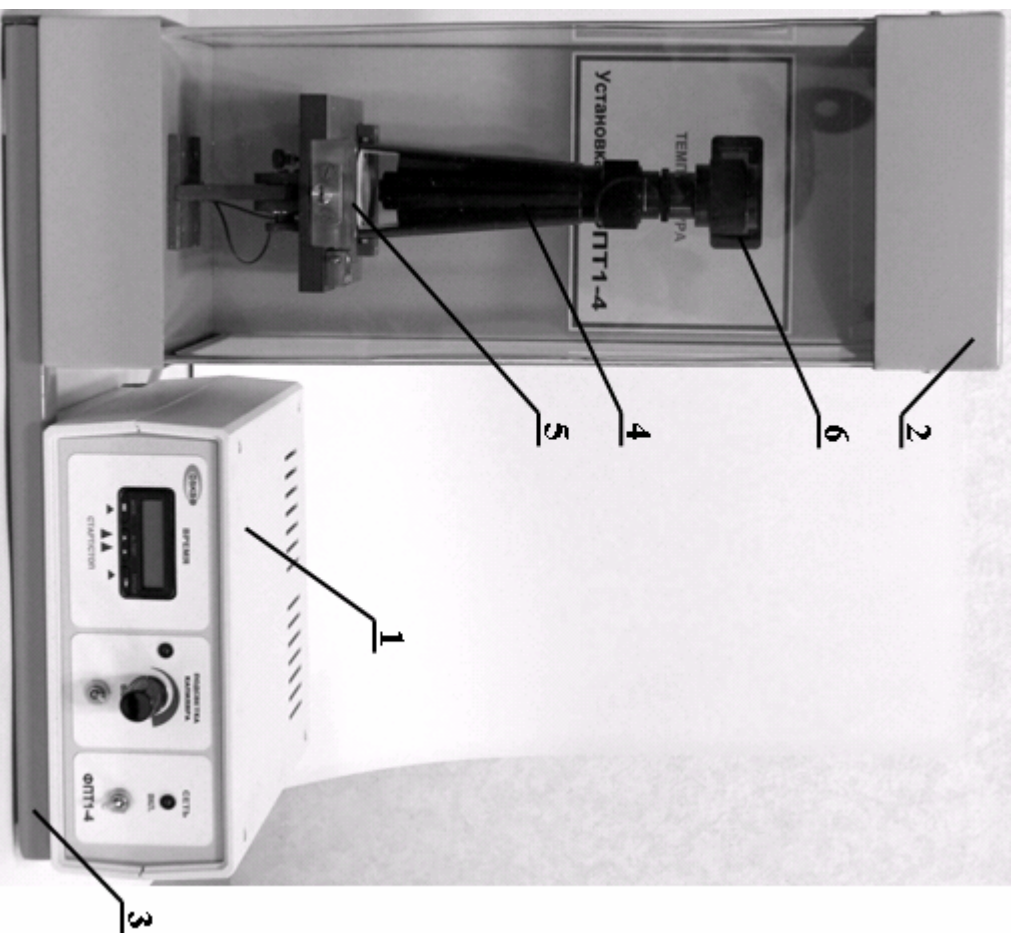


Рисунок 4.1 – Общий вид экспериментальной установки ФШТ-4
1 – блок приборов; 2 – блок рабочего элемента; 3 – стойка; 4 – микроскоп;
5 – рабочий элемент; 6 – цифровой контроллер для измерения температуры

Порядок выполнения работы

1. Снять защитный кожух с микроскопа и подвесить его на винтах задней панели. Тубус микроскопа поставить в положение, при котором предметный столик с рабочим элементом располагается горизонтально.
2. Заправить рабочий элемент водой. Для этого залить воду в ёмкость 1 (рис. 4.2) рабочего элемента, выдвинуть на 10...15 мм и снова задвинуть шток 2 (рис. 4.2).

Дальнейшие работы проводить не ранее, чем через 10...15 минут после заправки.

3. Убедившись в том, что регулятор подсветки капилляра в положении минимальной яркости, включить установку тумблером "Сеть".
4. Регулятором подсветки капилляра установить удобное для работы освещение. Органам настройки микроскопа добиться четкого изображения капилляра.

5. Перемещая капилляр вращением гайки 3 (рис. 4.2) рабочего элемента, установить изображение верхнего края капилляра напротив нулевого деления шкалы окуляра микроскопа, т.е. $h_0=0$, и зафиксировать это положение винтом 4 (рис. 4.2).
6. Фокусировать микроскоп на нижней жидкости. Определить расстояние h от края капилляра до мениска по шкале микроскопа в соответствии с рис. 4.3. Значение h занести в таблицу 4.1.

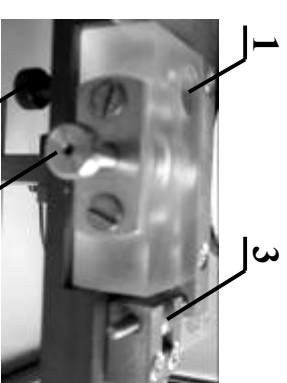


Рисунок 4.2 Рабочий элемент

№ изм.	h , м	n , дел.	τ , с	$\Delta h/\Delta \tau$, дел./с	$\Delta h/\Delta \tau$, м/с	P_0 , Па	T , К	P_H , Па	P_L , Па	D_s , м ² /с

Таблица 4.1

7. Включить, отсчёт времени.
8. Наблюдая в микроскоп за движением мениска жидкости через каждые 5 делений шкалы окуляра, занести в таблицу 4.1 значение n и время τ испарения жидкости.
9. Сделать 8-10 измерений положения мениска.
10. Измерить температуру воздуха в рабочем элементе установки.
11. Установить регулятор подсветки капилляра в положение минимальной яркости, после чего выключить установку тумблером "Сеть". Тубус микроскопа установить в вертикальное положение.

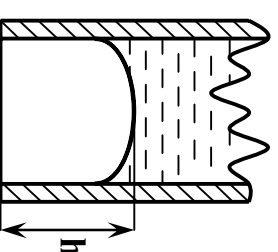


Рисунок 4.3 Определение положения мениска

Обработка результатов измерений

1. Построить график зависимости числа делений n окулярной шкалы микроскопа от времени τ : $n=f(\tau)$ и по наклону полученной усредненной прямой определить среднее значение $\frac{\Delta n}{\Delta \tau}$. Домножив эту величину на цену деления α окулярной шкалы, найти среднее значение скорости испарения жидкости с капилляра $\frac{\Delta h}{\Delta \tau}$.

2. Используя найденное значение $\frac{\Delta h}{\Delta \tau}$, по формуле (4.8) или (4.7) (по

указанию преподавателя) вычислить коэффициент взаимной диффузии воздуха и водяного пара, учитывая, что плотность воды $\rho_{\text{ж}}=10^3 \text{ кг/м}^3$, молярная масса воды $\mu=18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$. Давление насыщенного водяного пара определить из таблицы 4.2, где приведена зависимость давления P_H и плотность ρ насыщенного водяного пара от температуры, а давление водяного пара P_I возле открытого конца трубки найти по значению относительной влажности φ (в процентах) в помещении лаборатории:

$$P_I = \frac{\varphi}{100} \cdot P_H.$$

3. Оценить погрешность результатов измерения.

Таблица 4.2

t , °C	P_H , кПа	ρ , 10^{-3} кг/м^3	t , °C	P_H , кПа	ρ , 10^{-3} кг/м^3
15	1,704	12,84	19	2,196	16,32
16	1,817	13,65	20	2,337	17,32
17	1,937	14,50	21	2,486	18,35
18	2,062	15,39	22	2,642	19,44
			23	2,809	20,60
			24	2,984	21,81
			25	3,168	23,07
			26	3,361	24,40

Контрольные задания

1. В чем заключается явление диффузии? Какая величина переносится при диффузии?
2. Напишите формулу закона Фика и объясните физический смысл коэффициента диффузии.
3. Напишите формулу для коэффициента диффузии идеального газа.
4. Что такое парциальное давление? Как можно определить давление смеси газов?
5. Что такое относительная влажность воздуха? Как можно измерить эту величину?
6. В чем заключается метод определения коэффициента взаимной диффузии воздуха и водяного пара по скорости испарения жидкости с капилляра?
7. Выведите расчетную формулу для определения коэффициента взаимной диффузии.
8. Основные источники погрешностей данного метода измерений.