

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА
ВЗАИМНОЙ ДИФФУЗИИ ВОЗДУХА
И ВОДЯНОГО ПАРА**

САМАРА 2012

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЗАИМНОЙ ДИФФУЗИИ ВОЗДУХА И ВОДЯНОГО ПАРА

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний к лабораторной работе № 1-43*

САМАРА
Издательство СГАУ
2012

УДК 53(075)
ББК 22.313

Составитель *Н.М.Рогачев, С.И. Гусева*

Рецензент В.В. Б и р ю к, доктор технических наук, профессор

Определение коэффициента взаимной диффузии воздуха и водяного пара: метод. указания к лабораторной работе 1-43 / *Сост. Н.М.Рогачев, С.И. Гусева* – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 16 с.

Содержат методические и инструктивные материалы, необходимые для выполнения лабораторной работы по определению коэффициента взаимной диффузии воздуха и водяного пара. Приводится краткая теория и дается методика определения теплопроводности. Приведена схема экспериментальной установки и порядок выполнения работы, методика обработки полученных результатов; контрольные вопросы, список рекомендуемой литературы.

Предназначены для студентов всех факультетов.

УДК 53(075)
ББК 22.313

Лабораторная работа №1-43

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЗАИМНОЙ ДИФФУЗИИ ВОЗДУХА И ВОДЯНОГО ПАРА

Цель работы: изучение диффузии как одного из явлений переноса и экспериментальное определение коэффициента взаимной диффузии воздуха и водяного пара.

Приборы и принадлежности: экспериментальная установка ФПТ1-4, включающая микроскоп, рабочий элемент, цифровой контроллер для измерения температуры, приборный блок.

1.ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Диффузия – это явление самопроизвольного взаимного проникновения и перемешивания частиц двух соприкасающихся газов, жидкостей и даже твердых тел. В химически чистых газах диффузия возникает вследствие неодинаковой плотности в различных частях объема газа. В случае смеси газов причиной диффузии является различие в концентрации отдельных газов в объеме смеси. Если это явление не осложнено изменением температуры по объему газа, то оно заключается в переносе массы газа из мест с большей концентрацией данного газа в места с меньшей концентрацией.

Масса компонента газа, которая переносится вследствие диффузии через поверхность площадью S , перпендикулярную к оси OX , за время τ , определяется законом Фика:

$$M = -D \frac{d\rho}{dx} S \tau, \quad (1)$$

где D – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом диффузии;

$\frac{d\rho}{dx}$ – градиент плотности компонента газа.

Таким образом, коэффициент диффузии численно равен массе вещества, которое диффундирует за единицу времени через плоскую поверхность единичной площади, проведенную в газе перпендикулярно к направлению переноса вещества при единичном градиенте плотности. Знак минус в формуле (1) показывает, что перенос массы вещества при диффузии осуществляется в направлении убывания плотности.

Для идеального газа коэффициента диффузии

$$D = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle. \quad (2)$$

Здесь $\langle \lambda \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекулы; $\langle v \rangle = \sqrt{8RT/(\pi\mu)}$ – средняя арифметическая скорость теплового движения молекул; R – универсальная газовая постоянная; μ – молярная масса газа.

Когда один и тот же объем занимает смесь газов (два газа и более), то полное давление смеси равно сумме парциальных давлений отдельных газов, из которых состоит смесь. *Парциальное давление газа определяется как давление этого газа, если бы он один занимал весь объем.* Этот экспериментальный закон был установлен Дальтоном и называется *законом Дальтона для смеси газов.* Согласно это-

му закону каждый газ в смеси создает парциальное давление, пропорциональное его молекулярной концентрации. Это положение согласуется с законом идеального газа, из которого следует, что полное давление

$$P = \frac{N}{V}kT, \quad (3)$$

где N – общее число молекул, $N = N_1 + N_2 + \dots + N_i$; k – постоянная Больцмана; V – объем; T – термодинамическая температура.

При этом имеем

$$P = \frac{N_1}{V}kT + \frac{N_2}{V}kT + \dots + \frac{N_i}{V}kT = P_1 + P_2 + \dots + P_i, \quad (4)$$

где P_1, P_2, \dots, P_i – парциальные давления каждого газа в смеси, а отношения $\frac{N_1}{V}, \frac{N_2}{V}, \dots, \frac{N_i}{V}$ – их концентрации.

Процесс испарения жидкости можно объяснить в рамках молекулярно-кинетической теории. Молекулы жидкости движутся с различными скоростями. Между этими молекулами имеются значительные силы притяжения, которые и удерживают их вместе в жидком состоянии. Только те молекулы, кинетическая энергия которых больше некоторого определенного значения, могут перейти в газообразное состояние. При более высоких температурах скорость испарения больше.

Поскольку самые быстрые молекулы улетают с поверхности жидкости, средняя скорость оставшихся молекул уменьшается, а значит, абсолютная температура жидкости понижается. Таким образом, испарение представляет собой процесс охлаждения жидкости.

Воздух обычно содержит водяные пары (воду в газообразном состоянии), причем они попадают в воздух главным образом за счет испарения. Поскольку испарившиеся молекулы движутся вблизи поверхности жидкости, некоторые из них будут сталкиваться с ней и

возвращаться в жидкое состояние; этот процесс называется *конденсацией*. Число молекул пара возрастает до тех пор, пока не будут достигнуты такие условия, когда число возвращающихся в жидкость молекул равно числу молекул, покидающих жидкость за тот же промежуток времени. При этом наблюдается *состояние равновесия* и пространство над жидкостью *насыщено*. Давление пара, если он насыщен, называется *давлением насыщенного пара*. Оно в значительной степени зависит от температуры и в точке кипения равно атмосферному давлению.

Относительная влажность воздуха равна отношению парциального давления водяного пара в воздухе к давлению насыщенного пара при этой температуре; ее обычно выражают в процентах.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для определения коэффициента взаимной диффузии воздуха и водяного пара используется экспериментальная установка ФПТ1-4, общий вид которой изображен на рис. 1.

Основным элементом установки является микроскоп 4, на предметном столике которого размещены рабочий элемент 5, состоящий из измерителя, к подвижной части которого прикреплен корпус из оргстекла. В отверстии корпуса находится стеклянная трубка (капилляр) с дистиллированной водой. Для подсветки трубки при измерениях применяется фонарь, свет от которого передается рабочему элементу по корпусу из оргстекла. Яркость свечения лампы регулируется ручкой «Подсветка капилляра», которая находится на передней панели блока приборов 1, размещенных на стойке 3.

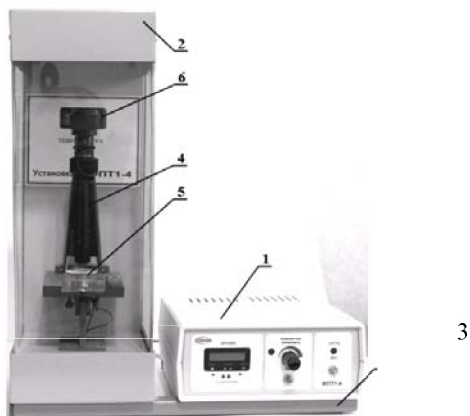


Рис. 1

Время испарения воды с 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 осуществляется нажатием кнопки «MODE», после опускания кнопки снова начинается отсчет времени.

Температура воздуха в блоке рабочего элемента 2 измеряется полупроводниковым термометром и регистрируется на цифровом индикаторе «Температура» блока рабочего устройства 6. Цена деления указана на шкале микроскопа.

3. ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

В работе используется наиболее распространенный метод определения коэффициента взаимной диффузии воздуха и водяного пара, основанный на измерении скорости испарения жидкости, частично заполняющей узкую трубку постоянного сечения S , в атмосферный воздух (рис. 2)

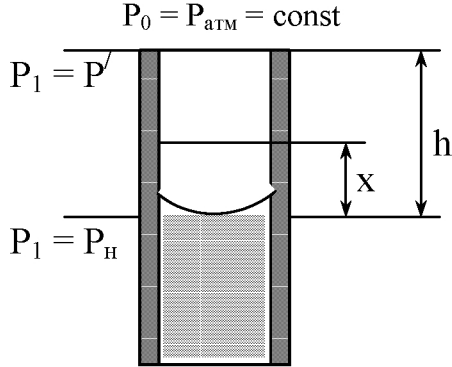


Рис. 2

На границе с водой при $x = 0$ (отсчет значений x ведется от мениска жидкости) парциальное давление водяного пара P_n в трубке равняется давлению насыщенного пара P_n при температуре опыта. Давление водяного пара в трубке изменяется вдоль оси x от значения P_n до давления P_1 около открытого конца трубки ($x = h$), которое определяется влажностью воздуха в лаборатории, следовательно, вдоль оси трубки существует градиент парциального давления dP_n / dx , вследствие чего в ней возникает диффузионный поток M пара, направленный вверх. Плотность пара ρ_n можно выразить через его парциальное давление, используя уравнение состояния идеального газа:

$$\rho_n = \frac{M}{V} = \frac{P_n \mu_n}{RT}. \quad (5)$$

Подставляя полученное соотношение (5) в формулу закона Фика (1), определим массу пара, которая переносится через площадь поперечного сечения трубки за одну секунду:

$$M_n = -D \frac{d\rho_n}{dx} S = -\frac{D \mu_n}{RT} \frac{dP_n}{dx} S. \quad (6)$$

Пренебрегая массой пара, переносимой конвекционным потоком, который возникает в трубке, массу пара M_n можно выразить через скорость понижения уровня жидкости в капилляре:

$$M_n = \rho_{ж} S \frac{\Delta h}{\Delta \tau}, \quad (7)$$

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

Подставим выражение (7) в формулу (6):

$$\rho_{ж} = \frac{\Delta h}{\Delta \tau} = - \frac{D \mu_n}{RT} \frac{dP_n}{dx}.$$

Разделяя переменные и интегрируя это равенство, получим:

$$\rho_{ж} RT \frac{\Delta h}{\Delta \tau} \int_0^h dx = - D \mu_n \int_{P_n}^{P_1} dP_n \quad \text{или} \quad \rho_{ж} RT \frac{\Delta h}{\Delta \tau} h = D \mu_n (P_n - P_1),$$

откуда

$$D = \frac{\rho_{ж} RT h}{\mu_n (P_n - P_1)} \frac{\Delta h}{\Delta \tau}, \quad (8)$$

где D – коэффициент взаимной диффузии; $\rho_{жс}$ – плотность жидкости (воды); R – универсальная газовая постоянная; 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_n – молярная масса воды; P_n – давление насыщенного пара; P_1 – давление пара, которое определяется влажностью воздуха в лаборатории.

Формула (8) используется для экспериментального определения коэффициента взаимной диффузии воздуха и водяного пара. При этом пренебрегается конвекционным потоком пара, который возникает в трубке.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Снимите защитный кожух с микроскопа и подвесьте его на винтах задней панели. Тубус микроскопа поставьте в положение, при котором предметный столик с рабочим элементом расположится горизонтально.

2. Заправьте рабочий элемент водой. Для этого залейте воду в емкость 1 (рис.3) рабочего элемента, выдвиньте на 10...15 мм и снова задвиньте шток 2 (рис.3).

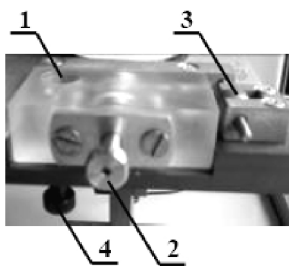


Рис. 3

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

3. Убедившись в том, что регулятор подсветки капилляра находится в положении минимальной яркости, включите установку тумблером «Сеть».

4. Регулятором подсветки капилляра установите удобное для работы освещение. Ручками настройки микроскопа добейтесь четкого изображения капилляра.

5. Перемещая капилляр вращением гайки 3 (рис.3) рабочего элемента, установите изображение верхнего края капилляра напротив нулевого деления шкалы окуляра микроскопа, т.е. $h_0 = 0$, и зафиксируйте это положение винтом 4 (рис.3).

ВНИМАНИЕ!!! Отсчет делений производится по левой шкале окуляра микроскопа с увеличением равным 50^{\times} , с ценой деления 0,02 мм.

6. Сфокусируйте микроскоп на мениске жидкости. По шкале микроскопа определите расстояние h от края капилляра до мениска. Значение h занесите в таблицу.

7. Проведите пробные включения цифрового секундомера. Для этого осторожным нажатием первой клавиши «MODE» (либо последовательными несколькими нажатиями этой клавиши) переведите секундомер в режим работы, при котором наблюдается мигание надписей «SUN», «FRI», «SAT» в верхней части табло секундомера. После этого все цифровые индикаторы должны высвечивать цифру ноль. Нажатием третьей клавиши «DATE /UP» запустите секундомер и, спустя малое время, нажатием той же клавиши остановите его. Нажав вторую клавишу «AL-T /SET», сбросьте на ноль значения на табло секундомера. Включите отсчет времени.

8. Наблюдая в микроскоп за движением мениска жидкости, через каждые 5 делений шкалы окуляра занесите в табл. 1 значения h (деления шкалы) и время испарения жидкости τ .

9. Сделайте 8-10 измерений положений мениска.

10. Измерьте температуру воздуха в рабочем элементе установки.

11. Установите регулятор подсветки капилляра в положение минимальной яркости, после чего выключите установку тумблером «Сеть». Тубус микроскопа установите в вертикальное положение.

12. Заполните таблицу «Основные метрологические характеристики приборов» (цифрового секундомера, цифрового датчика температуры, микроскопа). Диапазон измерений секундомера 0–29 мин 59,99 с, температуры – 0–100 °С.

Таблица 1

Номер измер.	$h,$ $м$	$n,$ $дел.$	$\tau,$ $с$	$\Delta n/\Delta\tau,$ $дел./с$	$\Delta h/\Delta\tau,$ $м/с$	$P_0,$ $Па$	$T,$ $К$	$P_{нв},$ $Па$	$P_1,$ $Па$	$D,$ $м/с^2$
1										
2										
3										
4										
5										

13. Установите регулятор подсветки капилляра в положение минимальной яркости, после чего выключите установку тумблером «Сеть».

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

По данным табл. 1 постройте график $n = f(\tau)$, откладывая по оси ординат число делений n окулярной шкалы микроскопа, а по оси абсцисс – время τ . По нанесенным на графике опытными точкам, проведите усредненную прямую и по ее наклону определите среднее значение $\Delta n/\Delta\tau$. Умножая величину $\Delta n/\Delta\tau$ на цену деления окулярной шкалы, найдите среднее значение скорости испарения жидкости с капилляра $\Delta h/\Delta\tau$.

Используя найденное значение $\Delta h/\Delta\tau$, по формуле (8) вычислите коэффициент взаимной диффузии воздуха и водяного пара, учитывая, что плотность воды $\rho_{жс} = 10^3 \text{ кг/м}^3$, молярная масса воды $\mu = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$. Давление насыщенного водяного пара определите из табл. 2, где приведена зависимость давления P_n и плотность ρ насыщенного водяного пара от температуры, а давление водяного пара

P_1 возле открытого конца трубки найдите по значению относительной влажности φ (в процентах) в помещении лаборатории:

$$P_1 = \frac{\varphi}{100} P_n \cdot$$

Таблица 2

Зависимость давления P_n и плотности ρ насыщенного водяного пара от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$P_n, \text{кПа}$	$\rho \cdot 10^{-3}, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$P_n, \text{кПа}$	$\rho \cdot 10^{-3}, \text{кг/м}^3$
15	1,704	12,84	21	2,486	18,35
16	1,817	13,65	22	2,642	19,44
17	1,937	14,50	23	2,809	20,60
18	2,062	15,39	24	2,984	21,81
19	2,196	16,32	25	3,168	23,07

Относительную влажность φ определяем по показаниям психрометра с помощью табл. 3.

Таблица 3

Психрометрическая таблица относительной влажности воздуха

Показания сухого термометра, $^\circ\text{C}$	Разность показаний сухого и влажного термометров, $^\circ\text{C}$										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	-
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	50	45	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

3. Проведите оценку случайных погрешностей измерений коэффициента взаимной диффузии. Для этого:

1) Найдите среднее арифметическое значение коэффициента взаимной диффузии $\langle D \rangle$:

$$\langle D \rangle = \Sigma D_i / n,$$

где n -число измерений.

2) Определите абсолютную погрешность отдельных измерений:

$$\Delta D_i = \langle D \rangle - D_i.$$

3) Найдите сумму $\Sigma (\Delta D_i)^2$.

4) Вычислите среднюю квадратичную погрешность

$$S_{Di} = \sqrt{\Sigma (\Delta D_i)^2 / (n-1)n}.$$

5) Определите границы доверительного интервала: $\Delta D_i = t_{\alpha,n} \cdot S_{Di}$.

Для нахождения $t_{\alpha,n}$ используйте таблицу коэффициентов Стьюдента. Доверительную вероятность α примите равной 0,95.

6) Запишите результаты измерений в виде:

$$D = \langle D \rangle \pm \Delta D; \alpha = 0,95; n = 10.$$

7) Вычислите относительную погрешность измерений коэффициента взаимной диффузии: $\varepsilon = (\Delta D / \langle D \rangle) \cdot 100\%$.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое диффузия? Какая физическая величина переносится при диффузии?

2. Запишите закон Фика. Объясните физический смысл коэффициента диффузии.

3. Какое явление называется испарением жидкости? Как влияет состояние динамического равновесия жидкости и ее пара на процесс испарения жидкости?

4. Какой пар называется насыщенным и что такое плотность насыщенного пара?

5. Что такое парциальное давление? Как можно определить давление смеси газов?

6. Что такое относительная влажность? Как можно измерить эту величину?

7. В чем заключается метод определения коэффициента взаимной диффузии воздуха и водяного пара по скорости испарения жидкости из капилляра?

8. Объясните, почему скорость диффузии много меньше тепловой скорости молекул.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М.: Высшая школа, 1998.

2. Кошкин М.И. Справочник по элементарной физике / М.И. Кошкин, М.Г. Ширкевич. – М.: Наука, 1988.

Учебное издание

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЗАИМНОЙ ДИФФУЗИИ ВОЗДУХА И ВОДЯНОГО ПАРА

*Методические указания
к лабораторной работе № 1-43*

Составители: ***Николай Михайлович Розачев***
Светлана Ивановна Гусева

Редактор И.И. Спиридонова
Вёрстка И.И. Спиридонова

Подписано в печать 02.01.2012. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ . Арт. М32/2012.

Самарский государственный аэрокосмический университет.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.