

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы № 2.4.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА  
ДИФФУЗИИ ПАРА ЛЕТУЧЕЙ ЖИДКОСТИ  
В ВОЗДУХЕ\***

---

\* Аникин А.И. Свойства газов. Свойства конденсированных систем: лабораторный практикум / А.И. Аникин; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. – Архангельск: ИД САФУ, 2014. – 48 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ ПАРА ЛЕТУЧЕЙ ЖИДКОСТИ В ВОЗДУХЕ

### 5.1. Теоретические положения

Если герметичный сосуд, из которого предварительно удален воздух, частично заполнить жидкостью, то она начнет испаряться, то есть переходить из жидкого состояния в газообразное. Процесс испарения обусловлен тем, что часть молекул жидкости переходит границу жидкой фазы и попадает в газообразную. Одновременно с процессом испарения происходит и обратный процесс – конденсация, обусловленный переходом части молекул из газообразной фазы в жидкую. По истечении некоторого времени, которое зависит от конкретных условий, в сосуде установится динамическое равновесие между жидкостью и паром. В состоянии равновесия число молекул, переходящих из жидкости в пар, равно числу молекул, переходящих из пара в жидкость за то же время. Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называют насыщенным. Давление насыщенного пара является функцией только его температуры.

Молекулярной диффузией называют явление самопроизвольного взаимного проникновения и перемешивания соприкасающихся газов, жидкостей и даже твердых тел. Молекулярная диффузия обусловлена хаотическим тепловым движением молекул. В смеси газов диффузия возникает в том случае, если концентрация компонентов смеси в различных точках пространства неодинакова. Такую диффузию называют концентрационной. В однородной по температурам и давлениям смеси процесс концентрационной диффузии сопровождается пере-

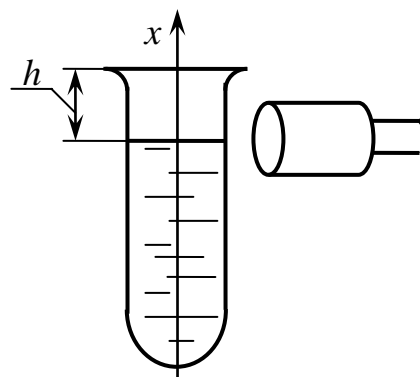


Рис. 5.1. Схема проведения эксперимента

носом массы вещества из мест с большей концентрацией в места с меньшей его концентрацией и стремится к выравниванию концентраций компонентов смеси.

Заполним частично жидкостью открытую вертикально расположенную пробирку (рис. 5.1). Жидкость начнет испаряться. Молекулы жидкости, перешедшие в газообразную фазу, вследствие хаотического теплового движения будут перемешиваться с молекулами воздуха и диффундировать в направлении верхнего открытого конца пробирки. Молекулы воздуха будут диффундировать в направлении, обратном направлению диффузии молекул пара, то есть к поверхности жидкости. По истечении некоторого времени установится стационарный режим, при котором распределение концентраций компонентов парогазовой смеси над поверхностью жидкости не будет изменяться с течением времени.

Плотность потока массы  $j_{\text{п}}$  пара, диффундирующего от поверхности жидкости в направлении оси  $x$ , можно определить по закону Фика

$$j_{\text{п}} = -Dm_{0\text{п}} \frac{dn_{\text{п}}}{dx}, \quad (5.1)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии;  $m_{0\text{п}}$  – масса одной молекулы пара;  $n_{\text{п}}$  – концентрация молекул пара;  $\frac{dn_{\text{п}}}{dx}$  – градиент концентрации молекул пара в направлении оси  $x$ .

В формуле (5.1) знак « $\rightarrow$ » указывает на то, что молекулы пара перемещаются в направлении убывания их концентрации.

Будем считать, что пар подчиняется законам идеального газа. В этом случае

$$n_{\text{п}} = \frac{p_{\text{п}}}{kT},$$

где  $p_{\text{п}}$  – парциальное давление пара;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура.

Подставляя значение  $n_{\text{п}}$  в формулу (5.1), получаем

$$j_{\text{п}} = - \frac{Dm_{\text{оп}}}{kT} \frac{dp_{\text{п}}}{dx} = - \frac{DM}{RT} \frac{dp_{\text{п}}}{dx},$$

где  $M$  – молярная масса пара;  $R$  – молярная газовая постоянная.

Плотность потока массы  $j_{\text{ж}}$  испаряющейся жидкости

$$j_{\text{ж}} = \rho_{\text{ж}} v,$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости;  $v$  – скорость понижения уровня жидкости в пробирке.

Так как при стационарном режиме  $j_{\text{п}} = j_{\text{ж}}$ , то

$$- \frac{DM}{RT} \frac{dp_{\text{п}}}{dx} = \rho_{\text{ж}} v. \quad (5.2)$$

Примем допущение, что вблизи поверхности жидкости ее пар является насыщенным. Тогда парциальное давление  $p'_{\text{п}}$  пара в этой области

$$p'_{\text{п}} = p_{\text{н.п}},$$

где  $p_{\text{н.п}}$  – давление насыщенного пара при температуре  $T$ .

У открытого конца пробирки концентрация молекул пара мала вследствие их рассеивания в воздушной среде. Поэтому примем допущение, что у открытого конца пробирки парциальное давление пара

$$p''_{\text{п}} = 0.$$

Коэффициент диффузии в газовой смеси слабо зависит от концентраций ее компонентов. Пренебрегая зависимостью коэффициента диффузии от состава смеси и учитывая, что при стационарном режиме испарения жидкости  $v = \text{const}$ , можно заменить производную в формуле (5.2) отношением конечных разностей:

$$\frac{dp_{\text{п}}}{dx} = \frac{p''_{\text{п}} - p'_{\text{п}}}{h} = - \frac{p_{\text{н.п}}}{h},$$

где  $h$  – расстояние от поверхности жидкости до верхнего конца пробирки.

Подставив значение  $\frac{dp_{\text{п}}}{dx}$  в формулу (5.2), выражаем коэффициент диффузии  $D$ :

$$D = \frac{\rho_{\text{ж}} v h R T}{M p_{\text{н.п}}}. \quad (5.3)$$

Молекулы пара могут свободно диффундировать в парогазовую среду. Для молекул воздуха поверхность жидкости является непроницаемой преградой, поэтому концентрация молекул воздуха у поверхности жидкости должна непрерывно увеличиваться. Так как при стационарном режиме распределение концентраций компонентов парогазовой смеси над поверхностью жидкости с течением времени не изменяется, то диффузионный поток молекул воздуха к поверхности жидкости должен компенсироваться конвективным потоком парогазовой смеси, направленным от поверхности жидкости к верхнему открытому концу пробирки. Этот поток называют стефановым потоком.

Зависимость (5.3) является приближенной, так как получена без учета конвективного потока, и, кроме того, при ее выводе были приняты допущения.

## 5.2. Экспериментальная установка

Исследуемую жидкость наливают в вертикально расположенную пробирку (см. рис. 5.1). Уровень испаряющейся жидкости измеряют с помощью микроскопа с окулярной шкалой. Температуру  $T$  жидкости и парогазовой смеси над ее поверхностью считают равной комнатной. При стационарном режиме скорость понижения уровня жидкости в пробирке  $v = \text{const}$ .

В качестве летучей жидкости в опытах используется этанол (химическая формула  $C_2H_5OH$ , молярная масса  $M = 46,1 \cdot 10^{-3}$  кг/моль, плотность  $\rho_{ж} = 790$  кг/м<sup>3</sup> при температуре  $t = 20$  °C).

Давление  $p_{н.п}$  насыщенных паров в зависимости от температуры  $T$  можно рассчитать по уравнению Антуана

$$\ln p_{н.п} = A - \frac{B}{T + C},$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – характерные для конкретного вещества постоянные величины.

Для паров этанола в интервале давлений от 10 до 1500 мм рт. ст. [2]

$$\ln p_{\text{н.п}} = 18,9119 - \frac{3803,98}{T - 41,68}, \quad (5.4)$$

где  $p_{\text{н.п}}$  – давление, мм рт. ст. (1 мм рт. ст. = 133,3 Па);  $T$  – температура, К.

### 5.3. Порядок выполнения работы и обработки результатов измерений

5.3.1. Записать перечень приборов и принадлежностей и их характеристики в отчет о лабораторной работе.

5.3.2. При помощи линейки измерить расстояние  $h$  от поверхности жидкости в пробирке до ее верхнего края.

5.3.3. Навести микроскоп на мениск жидкости в пробирке и установить резкое изображение мениска. По окулярной шкале микроскопа выполнить отсчет положения верхней кромки мениска и включить секундомер или отметить этот момент времени по часам. Аналогичные измерения выполнять через каждые 5 мин в течение 30–40 мин. Результаты измерений положения верхней кромки мениска  $x$  и времени  $\tau$  записать в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Изменение уровня жидкости в зависимости от времени

$\tau$									
$x$									

5.3.4. Используя данные табл. 5.1, построить график зависимости  $x = f(\tau)$  и по графику рассчитать среднюю скорость  $v$  понижения уровня жидкости

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta \tau},$$

где  $\Delta x$  – понижение уровня жидкости за время  $\Delta \tau$ .

5.3.5. По термометру измерить температуру  $T$  в помещении и рассчитать давление насыщенного пара жидкости по формуле (5.4).

5.3.6. Используя справочные данные, результаты измерений и расчетов, найти коэффициент диффузии по формуле (5.3). Полученные данные записать в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Результаты измерений и расчетов

$T$	$\rho_{ж}$	$p_{н.п}$	$h$	$v$	$D$

5.3.7. Сравнить полученное значение коэффициента диффузии  $D$  со справочными данными, приведенными в табл. 3 приложения.

5.3.8. Проанализировать полученные результаты.

#### 5.4. Контрольные вопросы

1. Какой пар называют насыщенным? От каких параметров зависит его давление?

2. Какое явление называют молекулярной диффузией? Чем обусловлено это явление?

3. Какие причины вызывают появление диффузии в смесях газов? Как называют такую диффузию?

4. В каких единицах Международной системы (СИ) выражают коэффициент диффузии?

5. Что означает термин «парциальное давление»?

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

### Коэффициенты Стьюдента

Число измерений	Доверительная вероятность $\alpha$				
	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
3	2,9	4,3	7,0	9,9	32
4	2,4	3,2	4,5	5,8	13
5	2,1	2,8	3,7	4,6	8,7
6	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9
7	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
8	1,9	2,4	3,0	3,5	5,4
9	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0
10	1,8	2,3	2,8	3,3	4,8
11	1,8	2,2	2,8	3,2	4,6
12	1,8	2,2	2,7	3,1	4,5
$\infty$	1,6	2,0	2,3	2,6	3,3

Таблица 2

Значения плотности  $\rho$ , эффективного диаметра  $d$  молекул и динамического коэффициента вязкости  $\eta$  некоторых газов при нормальных условиях

Вещество	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$d \cdot 10^9$ , м	$\eta \cdot 10^5$ , Па·с
Азот	1,25	0,37	1,67
Воздух	1,29	–	1,72
Кислород	1,43	0,35	1,92

Таблица 3

Значения коэффициента диффузии  $D$  паров этанола (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) в воздухе при различных температурах  $t$  и давлении  $p = 1,01 \cdot 10^5$  Па

$t$ , °C	14	16	18	20	22	24	26
$D \cdot 10^5$ , м <sup>2</sup> /с	1,15	1,16	1,18	1,19	1,20	1,22	1,23

Таблица 4

Значения плотности  $\rho$  и динамического коэффициента вязкости  $\eta$  воды при различных температурах  $t$  и давлении  $p = 1,01 \cdot 10^5$  Па

$t$ , °C	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	998,2	997,1	995,7	994,1	992,2	990,2	988,1	985,7	983,1	980,5	977,8
$\eta \cdot 10^3$ , Па·с	1,004	0,894	0,801	0,722	0,653	0,599	0,549	0,506	0,470	0,435	0,406



Таблица 5

Коэффициенты теплопроводности некоторых металлов

Вещество	Алюминий	Латунь	Бронза	Сталь
$\lambda$ , Вт/(м·К)	160 – 210	70 – 120	60 – 80	40 – 48

Таблица 6

Коэффициенты теплопроводности некоторых диэлектриков

Вещество	Стекло	Картон	Пенопласт	Текстолит
$\lambda$ , Вт/(м·К)	0,8 – 1,2	0,14 – 0,35	0,04 – 0,05	0,2 – 0,4

### СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курс физики: учебник для вузов. В 2 т. Т.2. / под ред. В.Н.Лозовского. – 4-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2006. – 592 с.
2. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: справочное пособие / пер. с англ.; под ред. В.И.Соколова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: учеб. пособие: в 3 т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. – 8-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2007. – 432 с.
4. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. – 16-е изд., стер. – М.: Академия, 2008. – 560 с.