



УДК 536.24

Замалеев Зуфар Харисович

кандидат технических наук, доцент

E-mail: kafedra.te@mail.ru

Шигапова Алсу Ильдаровна

студент

E-mail: shigapova.alsush@bk.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Диффузия паров водных растворов

Аннотация

Постановка задачи. Целью данной работы является получение экспериментальных значений коэффициента диффузии паров водных растворов и сравнение их с возможными, полученными разными полуэмпирическими методами.

Результаты. В результате исследования мы выявили значительные расхождения между величинами, определенными теоретически и экспериментально, между экспериментальными результатами, полученными разными методами. Даже полуэмпирические формулы, в которых коэффициенты диффузии имеют сопоставимый физический смысл, дают расхождения.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в экспериментальном определении коэффициентов диффузии паров воды и водного раствора аммония при различных концентрациях на основе реализации метода Стефана.

Ключевые слова: коэффициент диффузии, диффузионная трубка, критериальные зависимости, испарение, теплота.

Введение

Проведение множества технологических процессов часто сопровождается выделением теплоты, влаги и паров, что вызывает изменение состава и метеорологического состояния воздушной среды. Изменение состава воздуха негативно влияет на самочувствие людей, вызывает заболевания, понижает производительность труда. Для обеспечения оптимальных параметров микроклимата в помещениях, где используются устройства, связанные с испарением водных растворов солей, важен правильный расчет систем вентиляции.

В статье будут приведены экспериментальные значения коэффициента диффузии паров водных растворов и сравнение их с возможными, полученными различными полуэмпирическими методами, что в дальнейшем может использоваться в расчетах вытяжных систем вентиляции.

Основы теории

Под диффузией следует принимать самопроизвольный процесс, который стремится к установлению между фазами равновесного распределения концентраций; одновременно совершается перенос вещества из области большей концентрации в область с меньшей концентрации. Диффузия, равно как и массообмен в целом, может протекать как молекулярным (микроскопическим), так и молярным (макроскопическим) путем. Перенос вещества в системе, обусловленный тепловым хаотическим движением микрочастиц, получить название молекулярной диффузией. Перенос массы осуществляется за счет макроскопических сил, т.е. из-за конвекции.

В двухкомпонентной смеси, однородной по давлению и температуре, плотность потока массы одного из компонентов за счет молекулярной диффузии может быть вычислена при помощи закона Фика:

$$j_1 = -D_{1-2} \frac{\nabla r_1}{\nabla n} = -r \times D_{1-2} \frac{\nabla m_1}{\nabla n}, \quad (1)$$

где j_1 – плотность потока массы первого компонента;

$D_{1,2}$ – коэффициент молекулярной диффузии первого компонента относительно второго;
 ρ_1 – местная концентрация первого компонента;
 ρ – плотность смеси;
 $m_1 = \rho_1/\rho$ – относительная массовая концентрация первого компонента;
 n – направление нормали к поверхности одинаковой концентрации компонента;
 $d\rho_1/dn$, dm_1/dn – градиенты концентрации.

Коэффициент диффузии D зависит от температуры и давления смеси. Зависимость D от температуры T и давления P устанавливается формулой:

$$D = D_0 \times \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \times \left(\frac{P_0}{P} \right), \quad (2)$$

где D – коэффициент диффузии при температуре T ;
 D_0 – коэффициент диффузии при температуре T_0 .

Описание опытной установки

Опытная установка изображена на рис. 1. Диффузионная трубка 1 помещена в камеру 2, в которую вентилятором 3 подается струя воздуха, обеспечивающая нулевую концентрацию пара над верхним концом трубки. Контроль скорости и температуры струи осуществляется при помощи термоанемометра 4, датчик 5 которого установлен в камере 2. Измерение уровня жидкости в диффузионной трубке производилось катетометром 6.

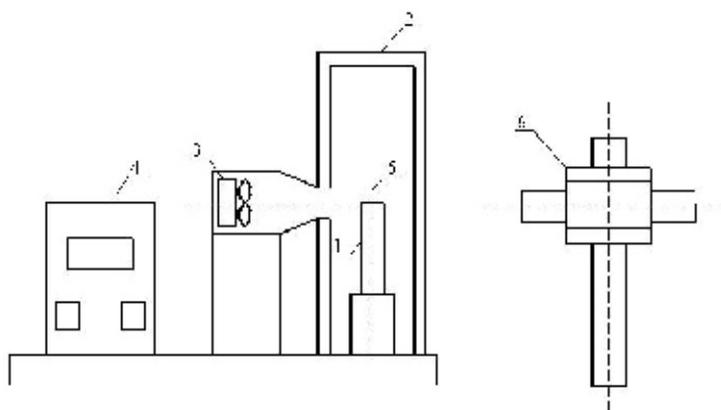


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Данная установка позволяет реализовать из существующих различных методов экспериментального исследования наиболее простой и испытанный стационарный метод Стефана.

Метод Стефана

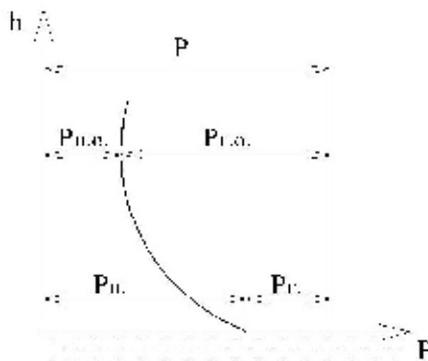


Рис. 2. График изменения парциального давления

Необходимым условием получения верных результатов является соблюдение следующих предпосылок, заложенных в основу метода:

- хорошее термостатирование, обеспечение одинаковой температуры газа и смеси в диффузионной части трубки;
- поддержание нулевой концентрации паров жидкости у открытого конца диффузионной трубки;
- выявление опытным путем минимальной длины диффузионного пути.

Для определения коэффициента диффузии паров жидкости при реализации метода Стефана используется обычно формула:

$$D = \frac{h \times \Delta h}{\Delta t} \times \frac{\rho_{ж}}{\mu_{ж}} \times R_m \times \frac{T}{P} \times \frac{1}{\ln \frac{P}{P - P_n}}, \quad (6)$$

где $h = \frac{h_1 + h_2}{2}$ – среднеарифметическая длина пути диффузии;

Δh – изменение уровня жидкости в результате испарения за время t ;

Δt – время опыта;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости;

$\mu_{ж}$ – молекулярная масса жидкости;

R_m – универсальная газовая постоянная;

T – температура;

P – давление газовой среды;

P_n – давление пара над поверхностью жидкости.

Результаты измерений и вычислений

Расчет по приведенной формуле (4) дал следующее значение коэффициента диффузии при испарении дистиллированной воды при $T=298\text{K}$; $P_{\text{бар}}=3365\text{Па}$; $D=25,9 \cdot 10^{-6}$, которое согласуется с табличными данными ($D_{\text{табл.}}=26,0 \cdot 10^{-6}$).

В эксперименте проводили четыре замера через большие промежутки времени.

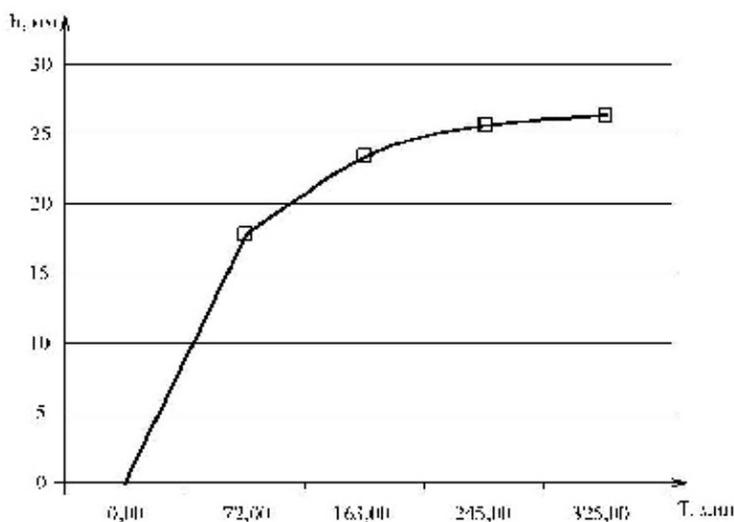


Рис. 4. Изменение столба жидкости для дистиллированной воды

Начало опыта: время 11:06. Начальный уровень жидкости в диффузионной трубке по показаниям катетометра равен 328,4 мм, температура мокрого термометра 19,4 °С, температура сухого термометра 23,4 °С.

1 замер: время 12:36. Уровень жидкости в диффузионной трубке по показаниям катетометра равен 317 мм. Произошло изменение уровня жидкости в диффузионной трубке равное 11,4 мм за 90 минут.

2 замер: время 14:07. Уровень жидкости в диффузионной трубке по показаниям катетометра равен 300,95 мм. Произошло изменение уровня жидкости в диффузионной трубке равное 16,05 мм за 91 минуту.

3 замер: время 15:29. Уровень жидкости в диффузионной трубке по показаниям катетометра равен 283,33 мм. Произошло изменение уровня жидкости в диффузионной трубке равное 17,62 мм за 82 минуты.

4 замер: время 16:49. Уровень жидкости в диффузионной трубке по показаниям катетометра равен 264,62мм. Произошло изменение уровня жидкости в диффузионной трубке равное 11,4 мм за 80 минут.

На рис. 4 приведена полученная экспериментальная зависимость $\Delta h=f(\Delta t)$ для дистиллированной воды.

Используя формулу Стефана, найдём коэффициент диффузии между замерами.

1 значение коэффициента диффузии между начальным замером и 1 замером:

$$D = \frac{0,33425 \times 0,0117}{5400} \times \frac{1000}{18,01528} \times 8,314 \times \frac{298}{3365} \times \frac{1}{\ln \frac{3365}{e^{3365 - 2741} \delta}} = 17,65 \times 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

2 значение коэффициента диффузии между замерами 1 и 2:

$$D = \frac{0,325025 \times 0,01605}{5460} \times \frac{1000}{18,01528} \times 8,314 \times \frac{298}{3365} \times \frac{1}{\ln \frac{3365}{e^{3365 - 2741} \delta}} = 23,1 \times 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

3 значение коэффициента диффузии между замерами 2 и 3:

$$D = \frac{0,29214 \times 0,01762}{4920} \times \frac{1000}{18,01528} \times 8,314 \times \frac{298}{3365} \times \frac{1}{\ln \frac{3365}{e^{3365 - 2741} \delta}} = 25,9 \times 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

4 значение коэффициента диффузии между замерами 3 и 4:

$$D = \frac{0,27399 \times 0,01874}{4800} \times \frac{1000}{18,01528} \times 8,314 \times \frac{298}{3365} \times \frac{1}{\ln \frac{3365}{e^{3365 - 2741} \delta}} = 25,9 \times 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Коэффициент диффузии, как известно, важная характеристика, его определение представляет значительные трудности.

Имеются значительные расхождения между величинами, определенными теоретически и экспериментальными результатами, полученными разными методами.

Даже полуэмпирические формулы, в которых коэффициенты диффузии имеют сопоставимый физический смысл, дают расхождения (табл. 1-2).

Расчетные выражения, по которым составлена таблица, следующие:

- метод Арнольда:

$$D_{12} = \frac{0,00837 \times T^{2,5} \times (M_1 + M_2)^{0,5}}{P \times (V_{e1}^{0,33} + V_{e2}^{0,33})^2 \times (T + S_{12}) \times (M_1 \times M_2)^{0,5}}; \quad (7)$$

- метод Джиллиленда:

$$D_{12} = \frac{0,0043 \times T^{1,5} \times (M_1 + M_2)^{0,5}}{P \times (V_{e1}^{0,33} + V_{e2}^{0,33})^2 \times (M_1 \times M_2)^{0,5}}; \quad (8)$$

- метод Слеттери:

$$D_{12} = \frac{K_S \times T^n \times (P_{к1} \times P_{к2})^{0,33} \times (T_{к1} \times T_{к2})^{0,42} \times (M_1 + M_2)^{0,5}}{P \times (M_1 \times M_2)^{0,5}}; \quad (9)$$

где D – коэффициент диффузии;

T – температура;

M – молекулярная масса;

P – давление;

V_B – молярный объём жидкости;

S – коэффициент Сатерленда;

P_K – критическое давление;

T_K – критическая температура.

Таблица 1

Сравнение экспериментальных значений коэффициента диффузии воды в воздух с расчетными

Смесь-газ	Температура, К	Эксперимент, $D \cdot 10^4, \text{ м}^2/\text{с}$	Коэффициент диффузии, вычисленный по методу:					
			Арнольда	Отклонение, %	Джиллиленда	Отклонение, %	Слеттери-Берда	Отклонение, %
Вода-воздух	298	0,259	0,229	-17	0,225	-20	0,262	-3

В расчетах систем вентиляции часто возникает необходимость определения количества пара, поступающего в воздух от испаряющегося раствора. При испарении водных растворов солей в условиях отсутствия капельного уноса речь идет о водяном паре, так как растворимость соли в паре, в большинстве случаев, невелика. Тогда коэффициент диффузии, входящий в расчетные критериальные зависимости для массообмена при испарении может рассматриваться как коэффициент диффузии водяного пара в воздух. Однако давление пара над раствором отличается от давления водяного пара при данной температуре и зависит от концентрации соли в жидкой фазе. Следовательно, и коэффициенты диффузии будут различными. В связи с этим возник вопрос экспериментального определения коэффициента диффузии паров водных растворов солей.

Эксперименты проводились с водными растворами нитрата аммония NH_4NO_3 . Необходимые для расчета коэффициента диффузии физические параметры брались из справочной литературы.

Таблица 2

Зависимость коэффициента диффузии от концентрации раствора

Концентрация раствора, %, масс.	0	10	20	30	40	50	60
P_n	2340	1640	2266	2173	2026	1840	1625
$D \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	25,9	29,4	26,4	22,9	16,32	14,81	14,65

Заключение

Как видно из приведенной таблицы, при малых концентрациях раствора (10 % – 2,44 мольн.) значение D выше, чем при испарении чистой воды. Очевидно, это связано с характером распределения соли между паром и жидкостью. Подобный характер прослеживался и по кинетическим кривым (изменения уровня испаряющегося раствора во времени): при малых концентрациях интенсивность испарения была выше, чем при больших.

Полученные значения коэффициента диффузии, входящие в расчетные критериальные зависимости для массообмена при испарении, могут быть использованы в расчетах вытяжных систем вентиляции.

Список библиографических ссылок

1. Зиганшин А. М., Посохин В. Н. О влиянии способа подвода тепла на результаты численного решения задачи о свободной конвекции над объёмным теплоисточником // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. № 3-4. С. 48–53.
2. Нарбеков А. И., Сергеенко Э. С. Диффузия паров водных растворов нитрата аммония в воздух. Тепломассообмен в отопительно-вентиляционных установках. Казань : КХТИ, 2009. 83 с.
3. Эльтерман В. М. Вентиляция химических производств. М. : Книга по требованию, 2012. 284 с.
4. Эккерт Э. Р., Дрейк Р. М. Теория тепло и массообмена. М. : Госэнергоиздат, 2012. 680 с.
5. Abou Al., Sood M. M., Birouk M. Droplet heat and mass transfer in a turbulent hot airstream. M. : Inter, 2008. С. 1313–1324.
6. Kumada T., Hirota T., Tamura N., Ishiguro R. Heat and mass transfer with liquid evaporation into a turbulent air stream. M : Letters in Heat and Mass Transfer, 2012. С. 1–9.

7. Volchkov E. P. Concerning the heat and mass transfer features on permeable surfaces. M. : Inter. J. Heat Mass Transfer, 2013. 755 с.
8. Коваленко Н. Д. Аэро-газодинамика и нестационарный теплообмен. М. : Книга по требованию, 2013. 148 с.
9. Бухмиров В. В. Теоретические основы теплотехники. Теплообмен. Иваново : ИГЭУ, 2010. 24 с.
10. Григорьев Б. А. Теплообмен. М. : Книга по требованию, 2013. 550 с.

Zamaleev Zufar Kharisovich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: kafedra.te@mail.ru**Shigapova Alsu Ildarovna**

student

E-mail: shigapova.alsush@bk.ru**Kazan state University of architecture and construction**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Diffusion of vapors of aqueous solutions**Abstract**

Problem statement. The aim of this work is to obtain experimental values of the diffusion coefficient of the vapor of aqueous solutions and their comparison with possible obtained by different semiempirical methods.

Results. As a result of the study, we found significant discrepancies between the values defined both theoretically and experimentally, between the experimental results obtained by different methods. Even semi-empirical formula in which the coefficients of diffusion have comparable physical sense, lead to differences.

Conclusions. The significance of the results for the construction industry lies in the experimental determination of diffusion coefficients of water vapor and aqueous ammonium at different concentrations based on the implementation of the method of Stephen.

Keywords: the diffusion coefficient, diffusion tube, the criterion of dependence, evaporation, heat.

References

1. Ziganshin A. M., Posokhin V. N. On the influence of the method of supplying heat to the numerical solution of the problem of free convection over a volumetric heat source // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2013. № 3-4. P. 48–53.
2. Narbekov A. I., Sergeenko E. S. Diffusion of vapors of aqueous solutions of ammonium nitrate in the air. *Heat and mass transfer in heating and ventilation installations*. Kazan : KKhTI, 2009. 83 p.
3. Alterman V. M. *Ventilation of chemical plants*. M. : *Kniga po trebovaniyu*, 2012. 284 p.
4. Eckert E. R., Drake R. M. *the Theory of heat and mass transfer*. M. : Gosenergoizdat, 2012. 680 p.
5. Abou Al., Sood M. M., Birouk M. Droplet heat and mass transfer in a turbulent hot airstream. M. : Inter, 2008. P. 1313–1324.
6. Kumada T. T., Hirota N., Tamura R. Ishiguro Heat and mass transfer with liquid evaporation into a turbulent air stream. M. : *Letters in Heat and Mass Transfer*, 2012. P. 1–9.
7. Volchkov E. P. Concerning the heat and mass transfer on permeable surfaces features. M. : Inter. J. Heat Mass Transfer, 2013. 755 p.
8. Kovalenko N. D. *Aero-gas dynamics and unsteady heat and mass transfer*. M. : *Kniga po trebovaniyu*, 2013. 148 p.
9. Bohirov V. V. *Theoretical principles of heat engineering. Heat and mass transfer*. Ivanovo : IGEU, 2010. 24 p.
10. Grigoriev B. A. *Heat And Mass Transfer*. M. : *Kniga po trebovaniyu*, 2013. 550 p.