

УДК 536.24

Шигапова А.И. – студентE-mail: shigapova.alsush@bk.ru**Замалеев З.Х.** – кандидат технических наук, доцентE-mail: kafedra.te@mail.ru**Валиуллин М.А.** – кандидат технических наук, доцент**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

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

Тепломассобмен при испарении водных растворов солей

Аннотация

Постановка задачи. Целью работы является получение экспериментальных значений коэффициента массоотдачи для уточнения критериальных уравнений, описывающих тепломассобмен при испарении водных растворов солей, а также определение количества испарившейся жидкости и выделяющейся при этом теплоты.

Результаты. Сравнение экспериментальных значений коэффициента массоотдачи показывает, что критериальные зависимости точно описывают характер процесса. Рассчитаны массовые количества испарившегося раствора в зависимости от концентрации и тепловые потоки с поверхности испарения.

Выводы. Анализ полученных результатов позволил установить, что при использовании критериальных зависимостей необходимо учитывать температурные и скоростные диапазоны, в которых коэффициент массоотдачи, полученный с помощью эмпирических формул, наиболее близок к экспериментальным данным. Определены критериальные уравнения, которые могут быть рекомендованы для расчета тепломассообменных характеристик при испарении водных растворов. Результаты работы могут быть использованы при расчетах и проектировании как общеобменной, так и местной вентиляции.

Ключевые слова: коэффициент диффузии, коэффициент массоотдачи, критериальные зависимости, конвекция, теплота.

В расчетах систем вентиляции промышленных зданий часто возникает необходимость определения количества пара, поступающего в воздух помещения от испаряющегося раствора с открытой поверхности.

Имеется ряд критериальных зависимостей для расчета тепломассообмена при испарении жидкости. Применение этих зависимостей требует знания такой массообменной характеристики, как коэффициент диффузии. В работе [1] было показано, что коэффициент диффузии паров водных растворов солей в воздух зависит от концентрации раствора и отличается от коэффициента диффузии водяного пара в воздух.

При испарении с горизонтальных поверхностей в условиях естественной конвекции в работе [2] рекомендуется уравнение:

- при $(Ar \cdot Pr_D) - 3 \cdot 10^6 \div 3 \cdot 10^8$:

$$Nu_D = 0,66 \cdot (Ar \cdot Pr_D)^{0,26}. \quad (1)$$

В работе [3] при испарении жидкостей, пары которых легче воздуха, предлагается уравнение:

- при $(Ar \cdot Pr_D) - 2 \cdot 10^2 \div 7 \cdot 10^5$:

$$Nu_D = (Ar \cdot Pr_D)^{0,25}, \quad (2)$$

- при $(Ar \cdot Pr_D) \geq 7 \cdot 10^5$ уравнение:

$$Nu_D = 0,18 \cdot (Ar \cdot Pr_D)^{0,25}. \quad (3)$$

При испарении с горизонтальных поверхностей в условиях вынужденной конвекции в работе [4] рекомендуется следующее соотношение:

- при $Re < 5 \cdot 10^5$:

$$Nu_D = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33}, \quad (4)$$

- при $Re > 5 \cdot 10^5$ уравнение:

$$Nu_D = 0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33}. \quad (5)$$

В работе [2] предлагаются следующие критериальные зависимости:

- при $Re = 3,15 \cdot 10^3 \div 2,2 \cdot 10^4$:

$$Nu_D = 0,49 \cdot Re^{0,61} \cdot Pr^{0,33} \cdot Gu^{0,135} \cdot \Theta^2, \quad (6)$$

- при $Re = 2,2 \cdot 10^4 \div 3,15 \cdot 10^4$:

$$Nu_D = 0,0248 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,33} \cdot Gu^{0,135} \cdot \Theta^2. \quad (7)$$

В уравнениях (1)-(7):

$$Nu_D = b \frac{l}{D}, \quad Pr_D = \frac{n}{D}, \quad q = \frac{T_c}{T_n}, \quad Ar = \frac{g \cdot l^3}{n^2} \cdot \frac{r_o - r_n}{r_o}, \quad Re = \frac{u \cdot l}{n}, \quad Gu = \frac{T_c - T_m}{T_c},$$

где β – коэффициент массоотдачи, м/с;

$l = \sqrt{F}$ – определяющий размер;

F – площадь поверхности испарения;

D – коэффициент диффузии, м²/с;

ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

ρ_n – плотность влажного воздуха у поверхности испарения, кг/м³;

ρ_o – плотность влажного воздуха вдали от поверхности испарения, кг/м³;

T_c – температура сухого термометра, К;

T_m – температура мокрого термометра, К;

T_n – температура поверхности жидкости, К.

Количество пара (испарившейся жидкости) определяется по формуле:

$$J = \beta \cdot (c_n - c_o) \cdot F, \text{ кг}^2/\text{м}^2 \cdot \text{с}, \quad (8)$$

где $b = \frac{Nu_D}{l}$ – коэффициент массоотдачи;

c_n, c_o – концентрация водяного пара соответственно над поверхностью жидкости и в окружающей среде, кг/м³.

Эта величина находится по уравнению состояния:

$$c = \frac{p \cdot m}{R_m \cdot T}, \quad (9)$$

где p – парциальное давление пара при температуре паровоздушной смеси, Па;

R_m – универсальная газовая постоянная, Дж/кмоль·К;

m – молекулярная масса пара, кг/моль.

Коэффициент диффузии может быть найден из уравнения:

$$D = D_{\text{табл}} \cdot \left(\frac{T}{293} \right)^{1,89} \cdot \frac{101325}{P_{\text{бар}}}. \quad (10)$$

Массоотдача при испарении ряда водных растворов солей исследовалась на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1.

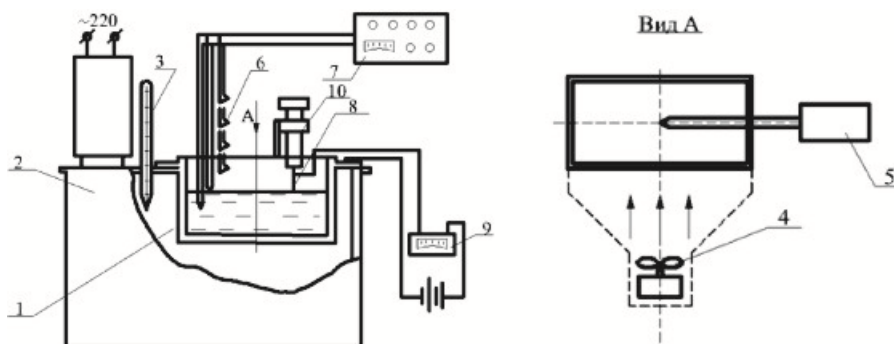


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Опытная камера 1 размерами 140×92×80 мм помещена в термостат 2. Температура термостатирования фиксировалась с помощью ртутного термометра 3. Поток воздуха над поверхностью жидкости создается вентилятором 4. Блок термопар 6 размещен следующим образом: одна термопара – в исследуемой жидкости, вторая – на поверхности жидкости, остальные 4 – над поверхностью жидкости. По мере испарения жидкости и снижения ее

уровня термпары, прикрепленные к вертикально перемещающейся плоскости, соответствующим образом перемещаются вниз. При этом фиксируется температура жидкости, ее поверхности и окружающей среды на разной высоте над поверхностью испарения. Значения температур определялись с помощью преобразователя 7.

Определение количества испарившейся жидкости проводится по ее убыли электроконтактным способом. При соприкосновении иглы 8 с поверхностью жидкости отклоняется стрелка гальванометра 9. В результате испарения уровень жидкости понижается, цепь размыкается. Через определенные интервалы времени Δt игла с помощью микрометрического винта приводится в соприкосновение с поверхностью жидкости, цепь снова замыкается. Показания микрометрического винта соответствуют убыли жидкости Δh . Массовое количество жидкости, испарившейся с поверхности, определится как:

$$j = \rho_{ж} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot F, \tag{11}$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости; $\frac{\Delta h}{\Delta t}$ – берется из стационарного режима испарения по прямолинейному участку графика $\Delta h = f(\tau)$.

Коэффициент массоотдачи β определится из (8).

Исследование массоотдачи проводилось при испарении воды и водных растворов нитрата аммония – NH_4NO_3 , сернистого аммония – $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, хлористого аммония NH_4Cl . Испарение воды исследовалось в интервале температур $t_{ж}=30,1\div 68^\circ\text{C}$, водных растворов солей при температуре $t_{ж}=39,1^\circ\text{C}$ во всем интервале концентраций. Параметры воздуха:

$T_{в} = 22^\circ\text{C}$, $\varphi = 55 \div 60 \%$, $P_{бар} = 750 \div 760$ мм. рт. ст., скорость $u = 0,5 \div 2,8$ м/с.

Результаты экспериментов представлены на рис. 2-6.

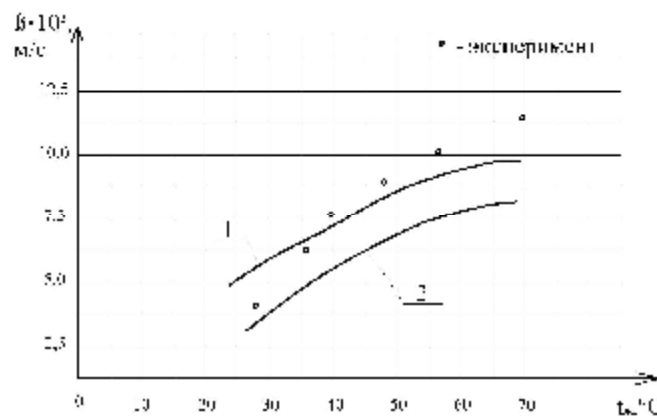


Рис. 2. Зависимость β от температуры воды: 1 – по уравнению (1), 2 – по уравнению (3)

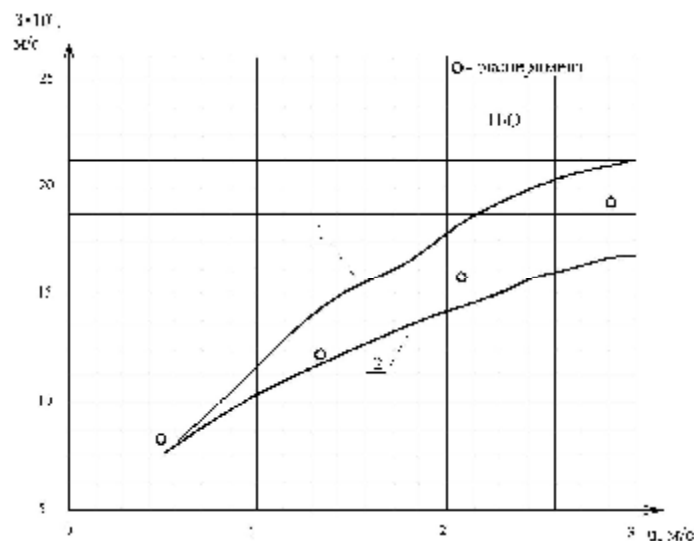


Рис. 3. Зависимость β от скорости потока: 1 – по уравнению (6), 2 – по уравнению (4)

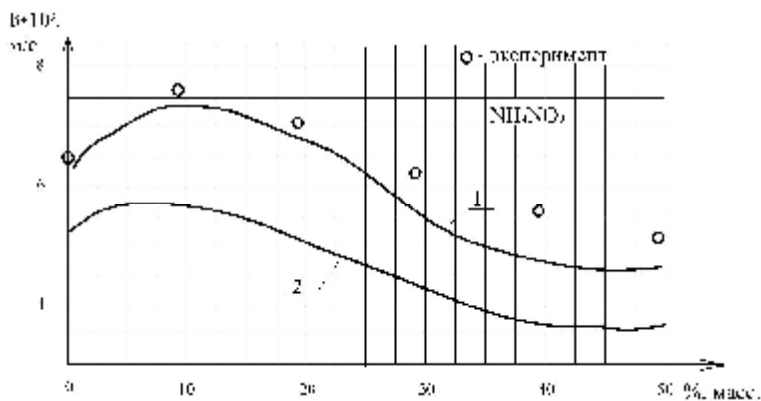


Рис. 4. Зависимость β от концентрации раствора: 1 – по уравнению (1), 2 – по уравнению (3)

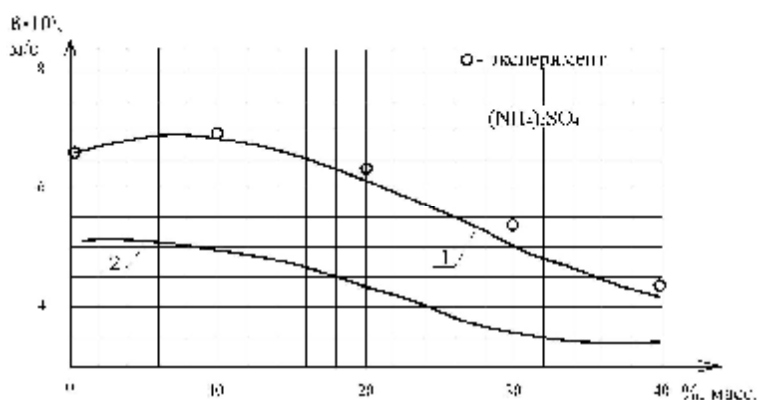


Рис. 5. Зависимость β от концентрации раствора: 1 – по уравнению (1), 2 – по уравнению (3)

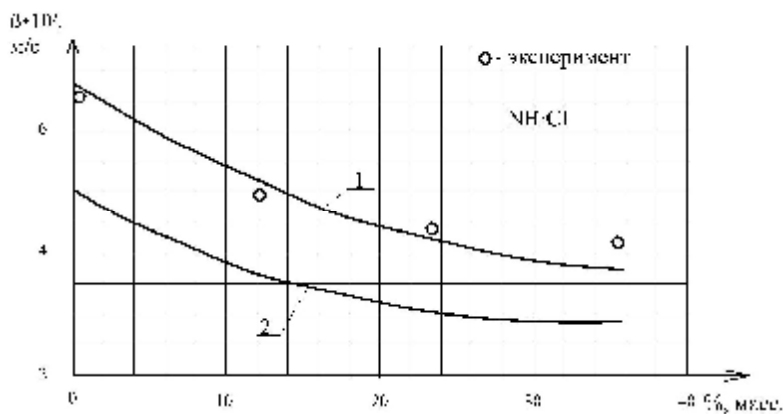


Рис. 6. Зависимость β от концентрации раствора: 1 – по уравнению (1), 2 – по уравнению (3)

При испарении воды экспериментальные значения β (рис. 2) при $t_{\text{ж}} \leq 30^\circ\text{C}$ ближе к рассчитанным по уравнению (3), при $t_{\text{ж}} \approx 33\text{--}50^\circ\text{C}$ значения β несколько выше, чем определенные по зависимости (1). В целом, критериальное уравнение (1) лучше описывает массоотдачу при испарении воды в условиях свободной конвекции.

Критериальные зависимости (4) и (6), используемые для расчета коэффициента массоотдачи при испарении в условиях вынужденной конвекции, при скоростях $u < 2 \text{ м/с}$ дают близкие значения β к полученным в эксперименте. С увеличением скорости расхождение возрастает. Экспериментальные значения β , как видно из рис. 3, занимают промежуточное значение между зависимостями (4) и (6).

Зависимость (4) получена из теоретического решения [4], а зависимость (6) – из обобщения экспериментальных данных с учетом термодинамических свойств влажного воздуха [2].

Сравнение экспериментальных значений β с рассчитанными по критериальным уравнениям (1) и (3) (рис. 4-6) показывает, что зависимость (1) также лучше описывает массоотдачу, особенно для водных растворов сернокислого и хлористого аммония (рис. 5-6).

Следует заметить, что при выборе критериальной зависимости важное значение имеет определение критического произведения ($Ar \cdot Pr_D$). Можно предположить, что при использовании численных значений $n=0,25$ в уравнении (1) и $n=0,33$ в зависимости (3) учитываются не все факторы, влияющие на массоотдачу при испарении.

Полученные экспериментальные результаты согласно уравнению (11) позволили также определить массовое количество жидкости, испарившейся с поверхности раствора. На рис. 7 показана зависимость количества испарившегося раствора с 1 м^2 поверхности от концентрации NH_4NO_3 , NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

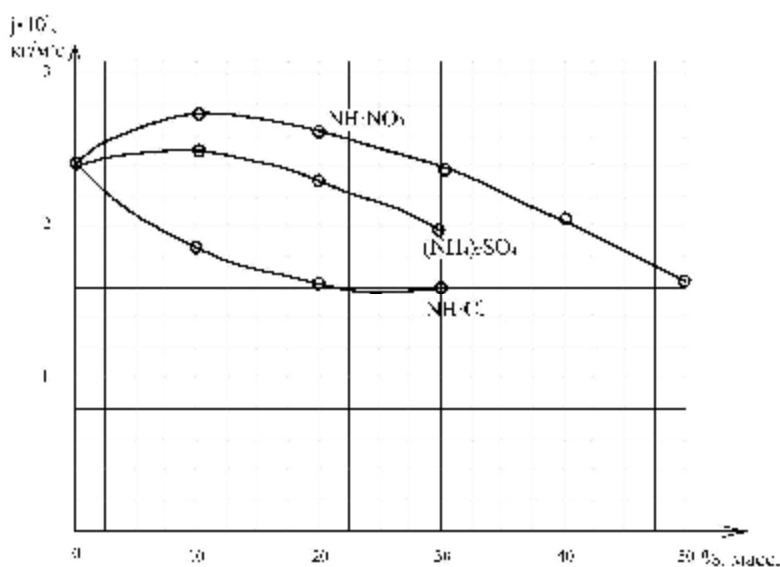


Рис. 7. Концентрационная зависимость количества испарившегося раствора

Изменение j от концентрации растворов NH_4NO_3 и $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ аналогично соответствующему изменению коэффициента диффузии паров в воздух. Для раствора хлористого аммония такого соответствия не наблюдается, что может быть связано с двумя причинами. Первая – отсутствие данных по изменению общего давления паров от концентрации раствора (при расчёте коэффициента диффузии используется лишь величина давления пара воды над раствором). Вторая причина – низкая температура насыщения раствора солью (наблюдается появление кристаллов соли на поверхности раствора).

Наряду с определением количества выделяющегося при испарении вещества необходимо зачастую устанавливать и количество теплоты, участвующей в процессе. Плотность теплового потока, передаваемого от поверхности раствора при его испарении в воздух, складывается из трех составляющих:

$$q = q_n + q_k + q_l, \quad (12)$$

где q_n – количество теплоты, переносимой в воздух вместе с парами раствора, Вт/м²;

q_k – количество теплоты, переносимой с поверхности раствора конвекцией, Вт/м²;

q_l – количество теплоты, отдаваемой с поверхности раствора излучением, Вт/м².

Составляющие уравнения (12) определяются по формулам:

$$q_n = j \cdot r, \quad (13)$$

$$q_k = \alpha \cdot (t_n - t_k), \quad (14)$$

$$q_l = e_n \cdot c_o \cdot \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right]. \quad (15)$$

В формулах (13)-(15):

r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг;

$a = Nu \cdot \frac{l}{l}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/м²·К;

Nu – критерий Нуссельта, характеризующий теплоотдачу при испарении жидкости в парогазовую среду;

ε_n – приведенная степень черноты системы;

$c_0 = 5,67$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/м²·К⁴.

Сводные данные по тепломассообмену при испарении исследованных водных растворов солей приведены в табл.

Таблица

**Сводные данные по тепломассообмену
при испарении исследованных водных растворов солей**

| Водный раствор NH ₄ NO ₃ | | | | | | |
|--|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Концентрация раствора %, масс | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| $\rho_{ж}$, кг/м ³ | 992,8 | 1039,8 | 1073,9 | 1117,6 | 1164,7 | 1214,8 |
| $j \cdot 10^4$, кг/м ² ·с | 2,45 | 2,83 | 2,61 | 2,38 | 2,07 | 1,68 |
| q_n , Вт/м ² | 590,4 | 682,0 | 629 | 573,5 | 498,8 | 404,8 |
| q , Вт/м ² | 745,5 | 837,1 | 784,1 | 728,6 | 653,9 | 559,9 |
| Водный раствор (NH ₄) ₂ SO ₄ | | | | | | |
| $\rho_{ж}$, кг/м ³ | 992,8 | 1050 | 1108 | 1163 | – | – |
| $j \cdot 10^4$, кг/м ² ·с | 2,48 | 2,6 | 2,35 | 2,02 | – | – |
| q_n , Вт/м ² | 590,4 | 626,5 | 566,3 | 486,8 | – | – |
| q , Вт/м ² | 745,5 | 781,6 | 721,4 | 641,9 | – | – |
| Водный раствор NH ₄ Cl | | | | | | |
| $\rho_{ж}$, кг/м ³ | 992,8 | 1021,9 | 1049,9 | 1065,6 | – | – |
| $j \cdot 10^4$, кг/м ² ·с | 2,45 | 1,83 | 1,71 | 1,62 | – | – |
| q_n , Вт/м ² | 590,4 | 441,0 | 412,1 | 390,4 | – | – |
| q , Вт/м ² | 745,5 | 596,1 | 567,2 | 545,5 | – | – |

Результаты по тепломассообмену при испарении водных растворов солей могут быть рекомендованы для расчета и проектирования как местной, так и общеобменной вентиляции.

Список библиографических ссылок

1. Нарбеков А. И., Сергеенко Э. С. Диффузия паров водных растворов нитрата аммония в воздух. Тепломассообмен в отопительно-вентиляционных установках. Казань : КХТИ, 2009. 83 с.
2. Нестеренко А. В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. М. : Книга по требованию, 2012. 460 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 тепломассообмен. М. : Книга по требованию, 2013. 148 с.
9. Бухмиров В. В. Теоретические основы теплотехники. Тепломассообмен. Иваново : ИГЭУ, 2010. 24 с.
10. Григорьев Б. А. Тепломассообмен. М. : Книга по требованию, 2013. 550 с.

Shigapova A.I. – student

E-mail: shigapova.alsush@bk.ru

Zamaleev Z.Kh. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: kafedra.te@mail.ru

Valiullin M.A. – candidate of technical sciences, associate professor

Kazan State University of Architecture and Engineering

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

Heat and mass transfer in the evaporation of aqueous solutions of salts

Abstract

Problem statement. The aim of this work is to obtain experimental values of the coefficient of mass transfer to clarify the criterion of equations describing the heat and mass transfer by evaporation of aqueous solutions of salts, as well as determining the quantity of evaporated liquid and released during this heat.

Results. The comparison of experimental values of the coefficient of mass transfer shows that the criterion according to precisely describe the nature of the process. The calculated mass number of evaporated solution, depending on concentration and heat fluxes from the surface evaporation.

Conclusions. Analysis of the obtained results has allowed to establish that, when using criterial dependencies, it is necessary to consider the temperature and speed ranges in which the coefficient of mass transfer obtained by empirical formula that is closest to the experimental data. Identified the criterial equations that can be recommended for the calculation of heat and mass transfer characteristics during the evaporation of aqueous solutions. The results can be used in the calculations and design as well as general exchange so local ventilation.

Keywords: the diffusion coefficient, mass transfer coefficient, the criterion of dependence, convection heat.

References

1. 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 : Kazan State Technological University, 2009. 83 p.
2. Nesterenko A. V. Fundamentals of thermodynamic calculations of ventilation and air-conditioning. M. : Book on demand, 2012. 460 p.
3. Alterman, V. M. Ventilation of chemical plants. M. : Book on demand, 2012. 284 p.
4. Eckert E. R., Drake R. M. 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. : Book on demand, 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. : Book on demand, 2013. 550 p.