

## Особенности протекания процессов тепло- и массообмена в форсуночной камере

А.Н.Гвоздков<sup>1,2</sup>, Р.Ш.Мансуров<sup>3</sup>, О.Ю.Суслова<sup>1</sup>, С.С.Абросимова<sup>1</sup>,  
А.И.Коваленко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет

<sup>2</sup> НИИ Строительной физики РААСН

<sup>3</sup> Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет

**Аннотация:** В данной статье рассмотрены особенности протекания процессов тепло- и массообмена с учетом формирования поверхности контакта при взаимодействии воздуха и капель воды, распыляемой в рабочем пространстве форсуночной камеры орошения. Представлены результаты численного моделирования процессов тепло- и массообмена, позволившие установить условия распыления жидкости, обеспечивающие наиболее эффективное протекание процессов тепло- и влагообмена в рабочем пространстве форсуночной камеры.

**Ключевые слова:** система кондиционирования воздуха, форсуночная камера, тепло- и массообмен, диффузионная модель, эффективность, параметры капли, расчетная модель, численное моделирование.

Одним из направлений повышения эффективности систем кондиционирования воздуха (СКВ) является оптимизация их энергопотребления, в частности, снижение затрат энергии на тепловлажностную обработку приточного воздуха в контактных аппаратах за счет интенсификации процессов тепло- и массообмена (ТМО) [1, 2].

Изучению процессов тепловлажностной обработки воздуха в различных типах контактных аппаратов посвящено большое количество исследований [3-5].

Как известно, наиболее широкое применение в качестве контактных аппаратов, используемых в составе центральных кондиционеров и других воздухоприготовительных центров, входящих в состав СКВ, получили форсуночные камеры орошения (ФКО), в которых поверхность контакта образуется при распылении воды с помощью широкофакельных центробежных форсунок [6-8].

Эффективность обработки воздуха в ФКО достигается как за счет значительной поверхности контакта с высокой плотностью орошения и полидисперсным спектром распыла капель, так и за счет различных технологий обработки воздуха в их рабочем пространстве [9].

Особый характер взаимодействия воздуха и воды в условиях развитой турбулентности, наличие фазовых превращений в условиях, близких к насыщенному состоянию воздуха, значительно затрудняют описание протекающих процессов ТМО.

В процессе взаимодействия изменяется температура потока воздуха, размер, скорость, траектория капли и др. параметры взаимодействия [6].

Одним из важнейших показателей при оценке эффективности работы ФКО является интенсивность процессов ТМО, в частности скорость испарения капли.

В настоящее время теоретические представления о процессах ТМО основаны на рассмотрении диффузионной модели, учитывающей влияние сил поверхностного натяжения при анализе фазовых превращений в результате обмена энергией контактирующих сред на границе раздела фаз [10,11].

Использование диффузионной модели предполагает, что на поверхности капли формируются пограничные слои, а влага находится в состоянии насыщения. При этом передача тепла в пределах пограничного слоя осуществляется путем теплопроводности, а перенос массы – молекулярной диффузией.

Конвективный теплообмен для сферической капли определяется из выражения:

$$m_d c_{pd} \frac{dT}{d\tau} = \alpha_d 4\pi R^2 \Delta T_d \quad (1)$$

где  $m_d$ ,  $c_{pd}$  - масса и теплоемкость капли;  $\alpha_d$  - коэффициент теплоотдачи;  $\Delta T_d = T_d - T$  - разность между температурой водяных паров на поверхности капли и в окружающем воздухе.

Скорость испарения одиночной капли представляется в виде:

$$W = \frac{dM}{d\tau} = 4\pi D r (c_d - c), \quad (2)$$

где  $M$  - масса капли;  $\tau$  - время;  $D$  - коэффициент диффузии молекул пара;  $c_d$  и  $c$  концентрация водяных паров, соответственно, на поверхности капли и в окружающем воздухе.

Следует отметить, что концентрация насыщенных водяных паров вблизи поверхности будет определяться не температурой окружающего воздуха, а температурой капли, величина которой в большинстве случаев является неизвестной.

Если не учитывать эту особенность процесса, то при определении скорости испарения невозможно получить достоверные результаты.

Время испарения  $\tau$  капли воды радиусом  $r_d$  до радиуса  $r_0$  определяется по формуле [12]:

$$\tau = \frac{\rho R T (r^2 - r_0^2)}{2 D m_{H_2O} (P_k - P)} = \frac{\rho R T (r^2 - r_0^2)}{2 D m_{H_2O} P_k (1 - \varphi_0)} \quad (3)$$

где  $\varphi_0$  - относительная влажность воздуха на вблизи поверхности капли.

Как показали экспериментальные исследования [11, 13], скорость и время испарения в случае мелких капель (менее 0,05мм) в 4÷6 раз меньше, чем дает формула 3. Это говорит о сильных упрощениях в диффузионной модели и требует проведения дополнительных исследований.

Следует также отметить, что время нахождения капли воды в рабочем пространстве ФКО при массовой скорости воздушного потока до 2,5 кг/с м<sup>2</sup> составляет около 0,37 сек. За столь короткий промежуток времени

проследить динамику изменения параметров капли при проведении физического эксперимента практически невозможно.

По этой причине для изучения особенностей процессов ТМО, протекающих в рабочем пространстве ФКО, особый интерес представляют методы их численного моделирования, в частности, в программном комплексе ANSYS.

Для проведения численного исследования процессов ТМО была выбрана смешанная эйлерово - лагранжева постановка задачи [14].

Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу с учетом межфазного взаимодействия, а также уравнения двухпараметрической модели турбулентности  $k-\varepsilon$  со стандартными константами.

Влагообмен между воздушной средой и водяной каплей определялся по зависимости:

$$\frac{dm_p}{dt} = \begin{cases} -\frac{Q_c}{V} & \text{если } T_p > T_B \\ \pi \cdot d_p \cdot \rho_p \cdot D \cdot Sh \frac{W_c}{W_G} \ln \left( \frac{1 - X_s}{1 - X_{vap}} \right) & \text{если } T_p < T_B \end{cases} \quad (4)$$

где  $V$  – скрытая теплота парообразования капель;  $Q_c$  – конвективный тепловой поток;  $T_B$  – точка испарения;  $d_p$  – диаметр капли;  $D$  – коэффициент диффузии;  $Sh$  – число Шервуда;  $W_c$  и  $W_G$  – молекулярные массы пара и воды;  $X_s$  – мольная доля равновесного пара испаряющегося компонента на поверхности капли;  $X_{vap}$  – мольная доля испаряющегося компонента в газовой фазе.

Численные исследования были направлены на изучение особенностей процессов ТМО, а также определение степени влияния различных параметров воздушной среды и параметров капли на их протекание.

Выходные параметры воздушной среды измерялись по конечным среднemasсовым значениям, параметры капли отслеживались по всей траектории ее полета через каждые 10 см от точки инъекции до выхода из расчетной области.

В качестве исследуемых рассматривались следующие параметры: время полета капли; изменение ее диаметра, температуры и скорости, а также среднее влагосодержание воздуха.

На основе математической модели в ANSYS CFX выполнена серия 3D расчетов, в которых изменялись параметры капли ( $d_p$ ,  $T_p$ ) и воздуха ( $W_\infty$ ,  $T_\infty$ ).

При выполнении расчетов принимались следующие значения входных переменных: температура воздуха ( $T_\infty$ ) - 10, 17, 24, 30°C; влагосодержание воздуха ( $W_\infty$ ) - 1, 5, 10 г/кг; температура капли ( $T_p$ ) - 15, 30, 45°C; диаметр капли ( $d_p$ ) - 1; 0,5; 0,2; 0,1; 0,05 мм, начальная скорость капли  $V_p=2$  м/с.

Параметры воздуха в начальный момент имели следующие значения: скорость  $V_\infty=0,1$  м/с; начальная температура ( $T_\infty$ ) - 10, 17, 24 и 30°C, а влагосодержание было равно ( $W_\infty$ ) - 1,5 и 10 г/кг.

Всего было рассчитано 180 вариантов различных сочетаний входных параметров. Задача решена в стационарном приближении.

В результате расчетов во всех исследованных случаях были получены поля температуры, скорости и диаметра капли, а также концентрации водяных паров. Проведено сравнение скорости испарения капель различных диаметров при различных начальных условиях взаимодействия.

В качестве наиболее эффективного рассматривался процесс, в котором капля воды полностью испаряется за время ее нахождения в рабочем пространстве.

Ниже показаны результаты наиболее интенсивных процессов увлажнения воздуха при высоких значениях  $T_p$  и  $T_\infty$  и влагосодержании воздуха  $W_\infty$ .

---

На рис. 1а представлена графическая зависимость изменения относительных размеров капель ( $y$ , %) различных начальных диаметров в зависимости от расстояния до точки инъекции  $x$  при значениях параметров  $T_{\infty}=30^{\circ}\text{C}$ ,  $W_{\infty}=1$  г/кг,  $T_p=45^{\circ}\text{C}$ .

Анализ результатов моделирования показывает, что в процессе ТМО изменение относительного размера капель с начальным диаметром 1,0 мм и 0,5 мм не превышает 4 %, что хорошо согласуется с результатами ранее проведенных исследований [15].

В то же время, капли с начальным диаметром 0,1 мм и 0,05 мм полностью испарились во время контакта, что говорит о высокой эффективности процесса ТМО при данных условиях взаимодействия сред.

На рис. 1б показана графическая зависимость влияния температуры воздуха  $T_{\infty}$  на изменение относительных размеров капель диаметром 0,1 мм и 0,05 мм при значениях параметров  $W_{\infty}=1$  г/кг и  $T_p=45^{\circ}\text{C}$  в процессе ТМО.

Как видно из полученного графика, если  $T_{\infty} < 24^{\circ}\text{C}$ , то капли диаметром 0,1 мм будут выпадать в поддон ФКО, не раскрывая полностью термодинамический потенциал своей эффективности.

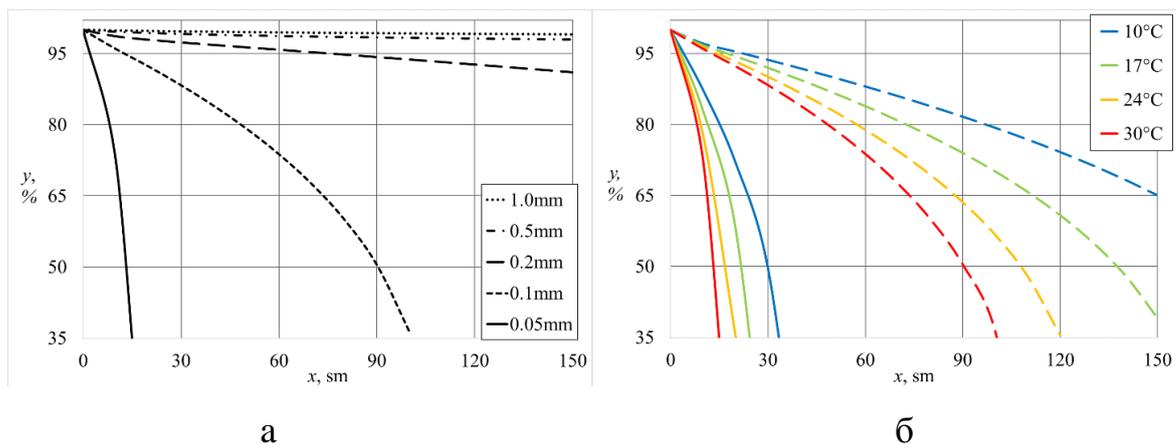


Рис.1. Относительные размеры капли в зависимости от расстояния до точки инъекции ( $x=0$  см): а - при различных начальных диаметрах капли при  $T_{\infty}=30^{\circ}\text{C}$ ,  $W_{\infty}=1$  г/кг,  $T_p=45^{\circ}\text{C}$ ; б - при различных температурах для капель 0,1

мм (штриховые линии) и 0,05 мм (сплошные линии) при  $W_\infty=1$  г/кг,  $T_p=45^\circ\text{C}$  (б).

На рис. 2 показано изменение температуры каплей,  $T_p$ , различных диаметров при  $W_\infty=1$  г/кг,  $T_\infty=30^\circ\text{C}$  и  $d_p=1$  (А), 0,5 (В), 0,2 (С), 0,1 (D) и 0,05 мм (Е). В случае А и В процесс увлажнения происходит наиболее интенсивно за счет высокого температурного напора, но размер каплей не позволяет им испариться полностью на протяжении всей траектории полета. В случаях С, D и Е изменение температуры капли до минимальной происходит в самом начале траектории, что с одной стороны уменьшает процессы интенсификации теплообмена, однако в случаях D и Е капли, размером 0,1 и 0,05 мм, полностью испаряются, не проходя всю траекторию.

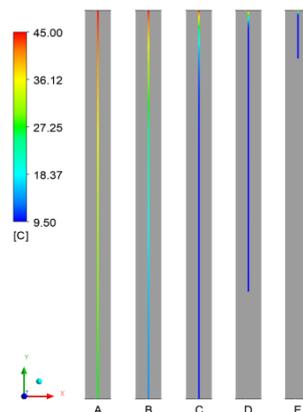


Рис.2. Изменение  $T_p$  различных диаметров при  $W_\infty=1$  г/кг,  $T_\infty=30^\circ\text{C}$  и

$d_p=1$  (А); 0,5(В); 0,2(С); 0,2(С); 0,1(D) и 0,05(Е)

На рис. 3 показано изменение  $d_p$  каплей 0,05 (а) и 0,1 мм (б) при  $W_\infty=1$  г/кг,  $T_p=45^\circ\text{C}$  и  $T_\infty=10$ (G), 17(Н), 24(К) и  $30^\circ\text{C}$ (L). Для каплей размером 0,05 мм. можно наблюдать, что при любых температурах в случае единичной капли испарение происходит в самом начале взаимодействия с воздухом. В опыте с размером капли 0,1 мм (случаи G и H) испарение происходит в самом конце канала. В реальных условиях обработки воздуха в ФКО, скорее всего, испарения капли в рабочем пространстве ФКО не произойдет.

Следовательно обработка каплями более 0,1мм для процесса увлажнения менее эффективна ввиду наличия капель, выпадающих в поддон камеры.

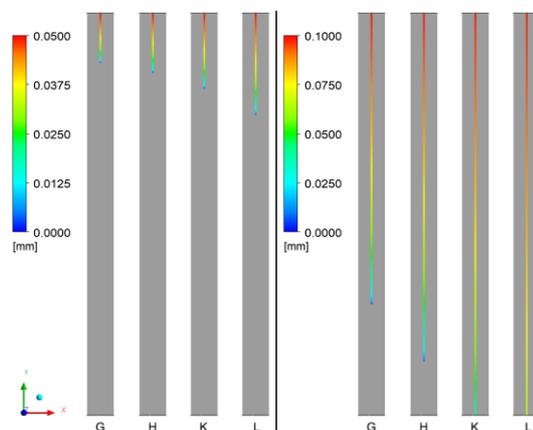


Рис.3. Изменение  $d_p$  каплей 0,05 (а) и 0,1 мм (b) при  $W_\infty=1$  g/kg,  $T_p=45^\circ\text{C}$  и  $T_\infty =10(\text{G});17(\text{H});24(\text{K})$  и  $30^\circ\text{C}$  (L)

*Заключение.* Изучение особенностей протекания процессов ТМО в форсуночной камере показало необходимость их численного моделирования.

Разработанная математическая модель движения водяной капли в воздушном канале позволила определить ее параметры для формирования оптимальных условий взаимодействия в рабочем пространстве ФКО, обеспечивающих наиболее эффективное протекание процессов ТМО.

В дальнейшем, построенная расчетная модель может быть использована при разработке новых устройств и для моделирования процессов ТМО в ФКО при решении вопросов оптимизации конструктивных решений рабочего пространства.

### Литература

1. Андреев Е.И. Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 192 с.
2. Gvozdkov A. Modern solutions to improve the efficiency of air treatment in HVAC systems: 9th International Conference "Environmental Engineering", 22-24 May, 2014, Vilnius, Lithuania. - Vilnius: Vilnius Gediminas Technical



University Press Technika, 2014. URL:  
enviro2014.vgtu.lt/Articles/6/260\_Gvozdkov.pdf

3. Гвоздков А.Н. Общая характеристика процессов тепло- и влагообмена в контактных аппаратах и методов их расчета // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2006. Вып. 6 (21). С. 148-153.

4. Богословский В. Н. Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха / В.Н. Богословский, М. Я. Поз. М.: Стройиздат, 1983. 320 с.

5. Тарабанов М.Г., Видин Ю.В., Бойков Г.П. Тепло- и массоперенос в камерах орошения кондиционеров с форсунками распыления. Красноярск: Изд-во КПИ, 1974. 211 с.

6. Кокорин О.Я. Энергосбережение в системах отопления, вентиляции, кондиционирования. М.: Издательство АСВ, 2013. 256 с.

7. Гвоздков А.Н., Суслова О.Ю., Авдонин А.В., Викстрем А.А., Разработка современных энергоэффективных воздухоприготовительных центров систем кондиционирования воздуха и вентиляции // Инженерный вестник Дона, 2017, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4195.

8. Гвоздков А.Н., Суслова О.Ю., Королев М.А., Решетников В.И. Регулирование влагосодержания приточного воздуха в многозональных СКВ общественных зданий // Инженерный вестник Дона, 2018, № 2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/5007.

9. Pandelidis, D.; Anisimov, S.; Worek William M. Performance study of the Maisotsenko Cycle heat exchangers in different air-conditioning applications. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Volume 81 (2015). pp. 207–221.

10. Hinds W.C. Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles. - John Wiley and Sons, New York. 1999. 504 p.
11. Косарев А.В., Ситников А.Г. Испарение сферической капли в газе среднего давления. // УФН. Т.171, №7, 2001. С. 765-774.
12. Фукс Н.А. спарение и рост капель в газовой среде. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 91 с.
13. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1988. 502 с.
14. Гвоздков А.Н., Мансуров Р.Ш., Сулова О.Ю. Численное исследование процессов тепло- и влагообмена в форсуночной камере // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды. Материалы XVIII Международной научной конференции. Москва, 25-29 сентября 2020 г. С. 204-214.
15. Стефанов Е. В. Об одной особенности процессов тепло- и массообмена в форсуночных камерах // Труды III Всесоюзного научно-технического совещания по кондиционированию воздуха. М., 1965. С.134-143

### References

1. Andreev E.I. Raschet teplo-i massoobmena v kontaknyh apparatah [Calculation of heat and mass transfer in the contact units]. L.: Jenergoatomizdat, 1985. 192 p.
  2. Gvozdkov A. 9th International Conference "Environmental Engineering", 22-24 May, 2014, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Vilnius Gediminas Technical University Press Technika. 2014. URL: [enviro2014.vgtu.lt/Articles/6/260\\_Gvozdkov.pdf](http://enviro2014.vgtu.lt/Articles/6/260_Gvozdkov.pdf).
  3. Gvozdkov A.N. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Ser. Stroitel'stvo i arhitektura. Volgograd: Izd-vo VolgGASU. 2006. Vyp. 6 (21). pp. 148-153.
-

4. Bogoslovskij V.N., Poz M.Ja. Teplofizika apparatov utilizacii tepla sistem otoplenija, ventiljacii i kondicionirovanija vozduha [Thermophysics of units waste heat recovery systems heating, ventilation and air-conditioning]. M.: Strojizdat, 1983. 320 p.
  5. Tarabanov M.G., Vidin Ju.V., Bojkov G.P. Teplo- i massoperenos v kamerah oroshenija kondicionerov s forsunkami raspylenija [Heat and mass transfer in spray chambers of air-conditioners with spray nozzles]. Krasnojarsk: KPI, 1974. 210 p.
  6. Kokorin O.Ja. Jenergoberezhenie v sistemah otoplenija, ventiljacii, kondicionirovanija [Energy saving in heating, ventilation, air conditioning systems]. M.: Izdatel'stvo ASV, 2013. 319 p.
  7. Gvozdkov A.N., Suslova O.YU., Avdonin A.V., Vikstrem A.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4195/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4195/).
  8. Gvozdkov A.N., Suslova O.YU., Korolev M.A., Reshetnikov V.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/5007/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/5007/).
  9. Pandelidis D., Anisimov S., Worek William M. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Volume 81 (2015). pp. 207–221.
  10. Hinds W.C. Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles. John Wiley and Sons, New York. 1999. 304 p.
  11. Kosarev A.V., Sitnikov A.G. UFN. T.171, №7, 2001. pp. 765-774.
  12. Fuks N.A. Isparenje i rost kapel' v gazovoj srede [Evaporation of droplets in a gas environment]. M.: Izd-vo AN SSSR. 1958. 91 p.
  13. Frank-Kameneckij D.A. Diffuziya i teploperedacha v himicheskoj kinetike [Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. M.: Nauka, 1988. 502 p.
-



14. Gvozdkov A.N., Mansurov R.Sh, Suslova O.Yu. Materialy XVIII Mezdunarodnoj nauchnoj konferencii (Moskva, 25-29 sentyabrya 2020 g.). Volgograd, 2020. pp. 255-262.

15. Stefanov E.V. Trudy III Vsesojuznogo nauchno-tekhnicheskogo soveschaniya po kondicionirovaniyu vozducha. M.: Strojizdat, 1965. pp.134-143.