Энергосбережение и энергоэффективность

УДК 697.932.5

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-1-121-126

© Т. А. Дацюк, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: tdatsuk@mail.ru

© А. Н. Гвоздков, канд. техн. наук, доцент
(Волгоградский государственный технический
университет, Волгоград, Россия)

E-mail: angvo@mail.ru

© Н. М. Крышкин, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: nkryshkin@gmail.com

© Т. А. Datciuk, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: tdatsuk@mail.ru

© А. N. Gvozdков, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Volgograd State Technical University,
Volgograd, Russia)

E-mail: angvo@mail.ru

© N. M. Kryshkin, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: nkryshkin@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕНА ВОЗДУХА И ЖИДКОЙ ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТИ СОТОВОГО УВЛАЖНИТЕЛЯ

NUMERICAL STUDY OF HEAT AND MASS TRANSFER OF THE AIR AND THE LIQUID FILM ON THE SURFACE OF A CELLULAR HUMIDIFIER

Представлены результаты численных экспериментов процесса взаимодействия воздуха и стекающей водяной пленки на поверхности сотового увлажнителя воздуха при адиабатической обработке воздуха. Эксперименты выполнены для орошаемых насадок различной глубины с применением программы StarCCM+. Результаты могут быть применены для совершенствования методов расчета тепломассовых процессов и повышения энергоэффективности аппаратов с орошаемой насадкой.

Ключевые слова: тепломассообмен, сотовый увлажнитель воздуха, орошаемая насадка, численный эксперимент, жидкая пленка.

The article presents numerical experiments results of the interaction process of the air and the flowing water film on the surface of a cellular humidifier during adiabatic air treatment. Experiments were carried out for irrigated packings of various depths using the StarCCM + program. The results obtained can be applied for improving the methods for calculating heat and mass transfer processes and increasing the energy efficiency of units with irrigated packings.

Keywords: heat and mass transfer, cellular humidifier, irrigated packing, numerical experiment, liquid film.

Для обеспечения требуемого состояния микроклимата в помещениях различного назначения важным аспектом является регулирование влагосодержания воздуха. Изучению особенностей процессов тепловлажностной обработки воздуха в различных контактных аппаратах систем кондиционирования воздуха (СКВ) по-

священо значительное количество работ [1–7]¹. Известно, что адиабатический процесс обработки воздуха считается наиболее энергоэффективным процессом, который может быть использован как в холодный, так и в теплый периоды года,

¹ Р 017 НОСТРОЙ 2.15.6–2014. Инженерные сети зданий и сооружений внутренние. Рекомендации по устройству энергоэффективных схем систем вентиляции и кондиционирования воздуха. М.: Изд-во БСТ, 2014. 114 с.

что особенно актуально для северных регионов [8]. Вопросы адиабатического процесса обработки воздуха рассматривались в работах многих ученых, в частности Е. В. Стефанова, А. Г. Сотникова, О. Я. Кокорина, С. М. Анисимова и других. Методы регулирования влагосодержания воздуха с использованием оросительной камеры изложены в работе [11].

Для изучения особенностей тепломассообменных процессов значительный интерес представляют численные эксперименты с применением различных гидродинамических комплексов, которые успешно используются при различных исследованиях [9, 10].

При создании математической модели в программе StarCCM+ по аналогии с работами [8, 12, 13] использована геометрическая модель насадки², построенная в программе SolidWorks, также принята модель идеального газа для воздуха и равномерность подачи воды на верхнюю часть насадки. На рис. 1 приведен элемент расчетной сетки насадки, состоящей из набора гофрированных листов. Профиль листов задан функцией $\cos(x)$.

Сетка создана при помощи встроенных в StarCCM+ автоматических генераторов: призматического слоя и поверхностной сетки. В численном эксперименте использованы осредненное по Рейнольдсу уравнение Навье–Стокса, k - ϵ модель турбулентности, уравнение энергии среды для энтальпии, модели жидкой пленки и испарения-конденсации, многофазное взаимодействие. При настройке модели приняты нестационарный неявный режим протекания процесса, функция «многокомпонентный газ», ламинарный режим движения для области жидкой пленки, Лагранжева многофазность. Учтена сила тяжести. Параметры выбраны для условий Волгограда [6].

Граничные условия, принятые при расчете:

- скорость воздуха в живом сечении орошаемой насадки 1,5 м/с;
- температура воздуха 33 °С;
- влагосодержание обрабатываемого воздуха 0,0013 кг/кг;
- массовый расход воды принят по каталогу².

Использован нестационарный неявный решатель с характеристиками, позволяющими обеспечить необходимую сходимость экспериментов. Численный эксперимент проведен для стандартных размеров орошаемых насадок глубиной 100, 200 и 300 мм².

В процессе эксперимента моделируются турбулентное движение воздуха в орошаемой насадке при адиабатическом его охлаждении и ламинарное стекание жидкой водяной пленки под действием гравитационных сил по поверхности насадки.

На основе численного моделирования тепломассообменных процессов в сотовом увлажнителе воздуха получены поля распределения температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха, в том числе при различной толщине насадки [12, 13]. Дальнейшая оптимизация процессов теплообмена в насадочных аппаратах,

STAR-CCM+

Рис. 1. Элемент расчетной сетки в области орошаемой насадки

² Каталог оборудования для систем вентиляции воздуха. Издание № 8. СПб.: Арктика, 2012. 684 с.

характеризующихся сложной геометрической структурой и специфическими теплофизическими свойствами, требует исследования процессов смачивания, характеристик стекающей пленки и их взаимодействия с воздушным потоком.

По результатам экспериментов построены поля распределения параметров — интенсивности испарения, толщины пленки и скорости движения воздуха (рис. 2–4).

На рис. 2 значения интенсивности испарения представлены с использованием единой шкалы. Наиболее эффективно процесс испарения происходит в насадке глубиной 100 мм, но не успевает завершиться до выхода воздуха из насадки. При глубине 200 мм примерно на 1/3 насадки интенсивность испарения отсутствует, что делает менее эффективным процесс увлажнения воздуха. Еще в большем масштабе такая картина характерна для насадки глубиной 300 мм, что позволяет сделать вывод о целесообразности исследования процесса испарения для других размеров насадки. При этом необходимо отметить,

что толщина пленки практически не отличается для насадок разной глубины (рис. 3).

Скорость движения жидкой пленки (рис. 4) зависит от глубины насадки. Так, для насадки глубиной 100 мм скорость находится в пределах 0,03–0,04; глубиной 200 мм — 0,02–0,025; глубиной 300 мм — 0,015–0,02. Очевидно, такой гидродинамический эффект влияет на интенсивность процесса испарения жидкой пленки и в конечном итоге на эффективность процесса влажностной обработки воздуха.

Выводы

Результаты проведенных численных экспериментов показывают существенное влияние размеров насадки сотового увлажнителя на скорость движения жидкой пленки и интенсивность ее испарения. При глубине насадки 100 мм имеет место наиболее эффективный процесс испарения, но не заверченный. При глубине насадки 200 мм процесс испарения заканчивается на глубине 2/3 от входа в насадку. Наименее эффективный процесс испарения в насадке глубиной 300 мм.

Рис. 2. Интенсивность испарения для орошаемых насадок различной глубины

Рис. 3. Толщина пленки для орошаемых насадок различной глубины

Рис. 4. Скорости движения стекающей пленки для орошаемых насадок различной глубины

Библиографический список

1. Стефанов Е. В. Вентиляция и кондиционирование воздуха. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2005. 402 с.
2. Тарабанов М. Г. Увлажнение воздуха в системах вентиляции и кондиционирования // Инженерные системы. АВОК Северо-Запад, 2009. № 3. С. 50–55.
3. Анисимов С. М. Тепломассообмен в аппаратах с пористой насадкой систем кондиционирования воздуха: дис. ... д-ра техн. наук по спец. 05.23.03. СПб., 1998. 385 с.
4. Майсоценко В. С. Тепломассообмен в косвенно-испарительных воздухоохладителях регенеративного типа // Промышленная теплотехника. 1987. Т. 9, № 2. С. 84–87.
5. Аверкин А. Г. Научные основы совершенствования устройств тепловлажностной обработки воздуха в системах кондиционирования: дис. ... д-ра техн. наук по спец. 05.23.03. Пенза, 2013. 332 с.
6. Гвоздков А. Н., Суслова О. Ю. К вопросу повышения энергетической эффективности систем кондиционирования воздуха и вентиляции на основе регулирования режимов обработки воздуха в контактных аппаратах // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Серия: Политематическая. 2014. Вып. 3 (34). Ст. 3. URL: vestnik.vgasu.ru/
7. Королёва Н. А. Разработка энергоэффективных систем кондиционирования воздуха с испарительным охлаждением и адиабатным увлажнением: дис. ... канд. техн. наук по спец. 05.23.03. Волгоград, 2015. 173 с.
8. Канев М. А. Создание влажностного режима в административных помещениях для северной климатической зоны: дис. ... канд. техн. наук по спец. 05.23.03. СПб., 2016. 169 с.
9. Гримитлин А. М., Дацюк Т. А., Денисихина Д. М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2013. 192 с.
10. Aver'yanov V., Ulyasheva V., Vasiliev V. Selection of turbulence models in case of numerical simulation of heat-, air- and mass exchange processes. E3S Web of Conferences 44, 00005 (2018) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184400005>
11. 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: indon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018.
12. Позин Г. М., Уляшева В. М., Крышкин Н. М. Численное моделирование процесса тепломассообмена в сотовом увлажнителе // Журнал С.О.К. 2019. № 2. С. 62–65.

13. Крышкин Н. М. Определение характеристик сотового увлажнителя в зависимости от глубины орошаемой насадки методом численного моделирования // Вестник гражданских инженеров, 2020. № 4 (81). С. 161–165.

References

1. Stefanov E. V. *Ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukha* [Air conditioning and ventilation]. St. Petersburg, AVOK Severo-Zapad Publ., 2005, 402 p.
2. Tarabanov M. G. *Uvlazhnenie vozdukha v sistemakh ventilyatsii i konditsionirovaniya* [Humidification of air in ventilation and air conditioning systems]. *Inzhenernye sistemy – Engineering Systems*, AVOK North West, 2009, no. 3, pp. 50–55.
3. Anisimov S. M. *Teplomassoobmen v apparatakh s poristoy nasadkoy sistem konditsionirovaniya vozdukha*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Heat and mass transfer in units with a porous packing of the air conditioning system. Dr. Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 1998, 385 p.
4. Maysotsenko V. S. *Teplomassoobmen v kosvenno-isparitel'nykh vozdukhokhladitelyakh regenerativnogo tipa* [Heat and mass transfer in indirect evaporative coolers of regenerative type]. *Promyshlennaya teplotekhnika – Industrial Heat Engineering*, 1987, vol. 9, no. 2, pp. 84–87.
5. Averkina A. G. *Nauchnye osnovy sovershenstvovaniya ustroystv teplovlazhnostnoy obrabotki vozdukha v sistemakh konditsionirovaniya*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Scientific bases of improving the units of heat and humidity treatment of the air in air-conditioning systems. Dr. Sci. Tech. diss.]. Penza, 2013, 332 p.
6. Gvozdkov A. N., Suslova O. Yu. *K voprosu povysheniya energeticheskoy effektivnosti sistem konditsionirovaniya vozdukha i ventilyatsii na osnove regulirovaniya rezhimov obrabotki vozdukha v kontaktnykh apparatakh* [On the issue of improving the energy efficiency of air conditioning and ventilation systems based on the regulation of air treatment modes in contact units]. *Internet-Vestnik VolgGASU. Ser.: Politematicheskaya – Internet-Bulletin of VolgGASU. Ser.: Polythematic*, 2014, iss. 3 (34), paper 3. Available at: vestnik.vgasu.ru/
7. Korolyova N. A. *Razrabotka energoeffektivnykh sistem konditsionirovaniya vozdukha s isparitel'nyim okhlazhdeniem i adiabatnym uvlazhneniem*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of energy-efficient air conditioning systems with evaporative cooling and adiabatic humidification. PhD in Sci. Tech. diss.]. Volgograd, 2015, 173 p.
8. Kanev M. A. *Sozdanie vlazhnostnogo rezhima v administrativnykh pomeshcheniyakh dlya severnoy klimaticheskoy zony*. Diss. kand. tekhn. nauk [Design of humidity regime in the administrative offices for

the Northern climate zone. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2016, 169 p.

9. Grititlin A. M., Datciuk T. A., Denisikhina D. M. *Matematicheskoe modelirovanie v proektirovanii sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya* [Mathematical modeling in the design of ventilation and air conditioning systems]. St. Petersburg, AVOK Severo-Zapad Publ., 2013, 192 p.

10. Aver'yanov V., Ulyasheva V., Vasiliev V. *Selection of turbulence models in case of numerical simulation of heat-, air- and mass exchange processes*. E3S Web of Conferences 44, 00005 (2018) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184400005>

11. Gvozdkov A. N., Suslova O. Yu., Korolev M. A., Reshetnikov V. I. *Regulirovanie vlagosoderzhaniya pritochnogo vozdukha v mnogozonal'nykh SKV obshchestvennykh zdaniy* [Regulation of the moisture content of the intake air in multi-zone air conditioning

systems of public buildings]. *Inzhenerniy vestnik Dona – Engineering Bulletin of the Don*, 2018, no. 2. Available at: indon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018

12. Pozin G. M., Ulyasheva V. M., Kryshkin N. M. *Chislennoe modelirovanie protsessa teplomassoobmena v sotovom uvlazhnitele* [Numerical simulation of the heat and mass transfer process in a cellular humidifier]. *Zhurnal S.O.K. (Santekhnika, Otoplenie, Konditsionirovanie) – Journal of Plumbing, Heating, Air Conditioning*, 2019, no. 2, pp. 62–65.

13. Kryshkin N. M. *Opredelenie kharakteristik sotovogo uvlazhnitelya v zavisimosti ot glubiny oroshaemoy nasadki metodom chislennogo modelirovaniya* [Determining the characteristics of a cellular humidifier depending on the depth of the irrigated nozzle by numerical modeling method]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 4 (81), pp. 161–165.