УДК 697.932.5

© Н. М. Крышкин, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: nkryshkin@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-4-161-165

© N. M. Kryshkin, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: nkryshkin@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОТОВОГО УВЛАЖНИТЕЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЛУБИНЫ ОРОШАЕМОЙ НАСАДКИ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF A CELLULAR HUMIDIFIER DEPENDING ON THE DEPTH OF THE IRRIGATED NOZZLE BY NUMERICAL MODELING METHOD

Представлены результаты численных экспериментов процесса обработки воздуха в системах кондиционирования с помощью орошаемых насадок различной глубины с применением программы StarCCM+. Результаты могут быть применены для построения эмпирических зависимостей характеристик аппаратов с орошаемой насадкой от глубины данных насадок.

Ключевые слова: тепломассообмен, сотовый увлажнитель, орошаемая насадка, численный эксперимент, адиабатическая эффективность.

The results of numerical experiments of the air treatment process in conditioning systems using irrigated nozzles of various depths by means of the StarCCM+ program are presented. The results obtained can be used to build empirical dependencies of characteristics for devices with irrigated nozzles on the depth of the nozzles.

Keywords: heat and mass transfer, cellular humidifier, irrigated nozzle, numerical experiment, adiabatic efficiency.

Основной инженерной задачей при подборе орошаемых насадок для обработки воздуха в системах кондиционирования является выбор из известного ряда (часто не более трех вариантов) насадки, обеспечивающей процесс, наиболее близкий к требуемому, на основании характеристик данных насадок, приведенных производителями для их фиксированной глубины. При этом отсутствуют универсальные зависимости, позволяющие способом расчета (не прибегая к методу подбора) определить непосредственно глубину насадки, которая позволила бы достичь требуемых параметров воздуха. Прямой расчет процессов тепломассообмена также не представляется возможным, так как сопряжен с необходимостью решения системы уравнений, включающей расчет турбулентного движения воздуха через сотовую насадку, ламинарное стекание жидкости по данной насадке, а также непосред-

ственно процесс тепломассообмена между потоками жидкости и воздуха¹ [1–5].

Ряд исследований, содержащий верифицированные данные, указывает на возможность применения для расчета процессов тепломассообмена в сотовых увлажнителях программ математического моделирования [6–9].

В программе StarCCM+ была построена математическая модель для процесса тепломассообмена в сотовом увлажнителе аналогично ранее проведенным работам [6, 9].

Приняты следующие допущения:

- модель идеального газа;
- не учтена неравномерность подачи жидкости на орошаемую насадку (в модели жидкость

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.: БСТ, 2014. 114 с.

подается равномерно на верхнюю кромку орошаемой насадки);

- в модели воспроизводится только непосредственно орошаемая насадка (при этом в реальных аппаратах за орошаемой насадкой чаще устанавливается каплеуловитель, который оказывает влияние на параметры обработанного воздуха);

- не учитывается структура материала, из которого изготовлена орошаемая насадка.

Для создания 3D-модели фрагмента исследуемого аппарата была применена программа SolidWorks.

Орошаемая насадка создана как отдельная деталь, состоящая из набора гофрированных листов. Наклон ребер листов поочередно меняется: 15° к горизонту по направлению движения воздуха и 45° — против направления движения воздуха. Разрез листов задан функцией $\cos x$. Высота гофрированных листов — 8 мм, расстояние между пиками функции $\cos x$ — 17 мм, толщина материала пластин — 1 мм. Между соседними листами оставлены зазоры по 0,01 мм для удобства дальнейшего построения расчетной сетки.

Так как присутствует ограничение на максимальное число ячеек расчетной сетки при численном моделировании в связи с ограниченным объемом оперативной памяти вычислительной техники, на которой производится расчет, к расчету принято сечение орошаемой насадки 100×100 мм. Данный выбор позволил достичь высокого количества ячеек расчетной сетки в сотах насадки, а именно минимум пять в поперечном сечении каждой соты (рис. 1).

Рис. 1. Фрагмент расчетной сетки в области орошаемой насадки

3D-модель орошаемой насадки экспортирована в программу StarCCM+ с целью расчета методом численного моделирования.

Создание расчетной сетки в построенной ранее геометрии выполнено в программе StarCCM+. Сетка создана при помощи встроенных в StarCCM+ автоматических генераторов. Для этого выбраны следующие параметры:

- генератор призматического слоя;
- триммер;
- генератор поверхностной сетки.

Для проведения численного эксперимента выбраны орошаемые насадки глубиной 100, 150, 200, 250 и 300 мм. Все эксперименты проведены при скорости в живом сечении насадок, равной 1,5 м/с.

После получения расчетной сетки модели изучаемой установки создана физическая модель процессов тепломассообмена, происходящих в аппарате. Совместно решаются две задачи:

1. Моделирование турбулентного движения воздуха во фрагменте установки с прохождением через орошаемую насадку и адиабатическим охлаждением в ней.

2. Моделирование ламинарного движения (стекания) пленки жидкости под действием силы тяжести по орошаемой насадке.

В физической модели исследуемого процесса приняты следующие параметры расчета [9]:

- нестационарный неявный режим протекания процесса;
- сила тяжести;
- уравнение энергии среды для энтальпии;
- несжимаемый идеальный газ;
- многокомпонентный газ;
- К-эпсилон-модель турбулентности;
- осредненное по Рейнольдсу уравнение Навье – Стокса;
- модель жидкой пленки;
- модель испарения-конденсации;
- ламинарный режим движения для области жидкой пленки;
- многофазное взаимодействие;
- Лагранжева многофазность.

Граничные условия заданы для входящего потока воздуха, а также для потока воды, подаваемой на орошаемую насадку. Граничные условия для выходящего потока воздуха не задаются (точнее, задаются в качестве функции поля со-

Рис. 2. Поля распределения температур для орошаемых насадок различной глубины

ответствующей физической величины), так как являются расчетными.

Для входящего потока воздуха заданы:

- скорость воздуха в живом сечении орошаемой насадки, равная 1,5 м/с;
- температура воздуха, равная 33 °С;
- влагосодержание обрабатываемого воздуха, составляющее 0,0013 кг/кг.

Для потока воды выбран массовый расход на основании рекомендаций технической документации «Арктос»². Массовый расход воды в математической модели задан 9,17 г/с. Использован нестационарный неявный решатель. Шаг по времени выбран 0,05 с, число внутренних итераций для каждого шага расчета равно 5. Данные настройки решателя позволили обеспечить сходимость расчета при всех проведенных экспериментах. Каждый численный эксперимент проводился до достижения стационарного характера функций системы (энергии, температуры, влажности и т. д.), а также характеристик орошаемой насадки (интенсивности испарения, толщины водяной пленки) и параметров обработанного воздуха (температуры, влагосодержания). Таким

образом, сходимость в каждом эксперименте наблюдалась через промежуток времени порядка 10 с (физического времени в рассчитываемой модели).

По результатам экспериментов построены поля распределения температур (рис. 2). Для удобства сравнения результатов все они представлены при идентичной температурной шкале.

Характеристики исследуемых сотовых увлажнителей и рассчитанные значения представлены в таблице.

Выводы

В результате проведенных численных экспериментов были получены данные о характеристиках сотовых увлажнителей с пятью различными орошаемыми насадками при идентичных входных параметрах воздуха. Изменение энтальпии воздуха во всех экспериментах составило менее 4 % (менее 2 % для всех экспериментов, кроме первого). Данные соответствуют ранее проведенным экспериментальным исследованиям для насадки глубиной 100 мм. Однако имеет место отклонение от данных производителя вследствие влияния начальной температуры воздуха, что требует дальнейших исследований в лабораторных условиях.

Результаты численных экспериментов

1	Глубина орошаемой насадки в исследуемом аппарате, мм	100	150	200	250	300
Входные параметры						
2	Температура входящего воздуха t_1 , °С	33				
3	Температура входящего воздуха по влажному термометру t_2 , °С	13				
4	Влагосодержание входящего воздуха d_1 , г/кг	1,3				
5	Влагосодержание насыщения входящего воздуха d_2 , г/кг	9,33				
6	Энтальпия входящего воздуха I_1 , кДж/кг	36,5				
Расчетные параметры воздуха						
7	Температура обработанного воздуха t_3 , °С	22,7	19,6	17,8	16,4	15,5
8	Относительная влажность обработанного воздуха φ , %	34,5	48,2	59,8	70,0	77,6
9	Влагосодержание обработанного воздуха d_3 , г/кг	5,91	6,83	7,58	8,13	8,51
10	Энтальпия обработанного воздуха I_2 , кДж/кг	37,8	37,0	37,1	37,0	37,1
11	Изменение энтальпии воздуха, %	3,6	1,4	1,6	1,4	1,6
12	Коэффициент адиабатической эффективности при расчете по изменению температуры E_{a1} , %	51,5	67,0	76,0	83,0	87,5
13	Коэффициент адиабатической эффективности при расчете по изменению влагосодержания E_{a2} , %	57,4	68,9	78,2	85,1	89,8
14	Осредненный коэффициент адиабатической эффективности $E_{a_{cp}}$, %	54,5	67,9	77,1	84,0	88,6

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. СПб., 1998. 386 с.
4. Аверкин А. Г. Научные основы совершенствования устройств тепловлажностной обработки воздуха в системах кондиционирования: дис. ... д-ра техн. наук. Пенза, 2013. 332 с.
5. Королёва Н. А. Разработка энергоэффективных систем кондиционирования воздуха с испарительным охлаждением и адиабатным увлажнением: дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2015. 173 с.
6. Канев М. А. Создание влажностного режима в административных помещениях для северной климатической зоны: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2016. 169 с.
7. Гримитлин А. М., Дацюк Т. А., Денисихина Д. М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2013. 192 с.
8. Васильев В. Ф., Уляшева В. М., Канев М. А., Рябев Г. А. О применении моделей турбулентности при численном моделировании процессов тепло-, воздухо- и массообмена // С.О.К. 2016. № 12. С. 66–69.
9. Позин Г. М., Уляшева В. М., Крышкин Н. М. Численное моделирование процесса тепломассообмена в сотовом увлажнителе // С.О.К. 2019. № 2. С. 62–65.

References

1. Stefanov E. V. *Ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukh* [Ventilation and air conditioning]. St. Petersburg, AVOK Severo-Zapad Publ., 2005, 402 p.
2. Tarabanov M. G. *Uvlazhnenie vozdukh* v sistemakh ventilyatsii i konditsionirovaniya [Humidification of air in ventilation and air conditioning systems]. AVOK Severo-

Zapad Publ., *Inzhenernye sistemy – Engineering systems*, 2009, no. 3, pp. 50–55.

3. Anisimov S. M. *Teplomassoobmen v apparatakh s poristoy nasadkoy sistem konditsionirovaniya vozdukh*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Heat and mass transfer in devices with a porous nozzle of air conditioning systems. Dr. Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 1998, 386 p.

4. Averkina A. G. *Nauchnye osnovy sovershenstvovaniya ustroystv teplovlazhnostnoy obrabotki vozdukh* v sistemakh konditsionirovaniya. Diss. dokt. tekhn. nauk [Scientific bases of improving of heat and humidity air treatment devices in air conditioning systems. Dr. Sci. Tech. diss.]. Penza, 2013, 332 p.

5. Korolyova N. A. *Razrabotka energoeffektivnykh sistem konditsionirovaniya vozdukh 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.

6. Kanev M. A. *Sozdanie vlazhnostnogo rezhima v administrativnykh pomeshcheniyakh dlya severnoy klimaticheskoy zony*. Diss. kand. tekhn. nauk [Creating a humidity regime in administrative premises for the Northern climate zone. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2016, 169 p.

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

8. Vasil'ev V. F., Ulyasheva V. M., Kanev M. A., Ryabev G. A. *O primenenii modeley turbulentnosti pri chislenno modelirovanii protsessov teplo-, vozdukh- i massoobmena* [On the application of turbulence models for numerical modeling of heat, air and mass transfer processes]. S.O.K. – Plumbing. Heating. Conditioning, 2016, no. 12, pp. 66–69.

9. Pozin G. M., Ulyasheva V. M., Kryshkin N. M. *Chislennoe modelirovanie protsessa teplomassoobmena v sotovom uvlazhnitele* [Numerical simulation of heat and mass transfer in a cellular humidifier]. S.O.K. – Plumbing. Heating. Conditioning, 2019, no. 2, pp. 62–65.