

Численное моделирование процесса теплообмена в сотовом увлажнителе

Вопросам совершенствования методов расчёта процессов теплообмена, в частности, для обеспечения адиабатного увлажнения воздуха, посвящён ряд работ Е.В. Стефанова, В.С. Майсоценко, А.Г. Сотникова, О.Я. Кокорина, С.М. Анисимова, М.Г. Тарабанова, А.Г. Аверкина и других [1–8]. Рассмотрены особенности теплообмена в различных контактных аппаратах систем кондиционирования воздуха (СКВ). Возможность применения этих процессов в холодный и тёплый периоды года, несомненно, определяет их энергоэффективность [9]. Результаты исследований процессов теплообмена в контактных аппаратах получены во многих случаях эмпирическим путём, например, в работах [7, 8]. Это обусловлено сложным характером взаимодействия потоков воздуха и воды, при этом наличие твёрдых поверхностей в насадочных аппаратах ещё более усложняет задачу.

При изучении теплообменных процессов в аппаратах контактного типа СКВ важным вопросом является формирование жидкостной плёнки на поверхности орошаемой насадки. В процессе стекания воды по поверхности орошаемой насадки одновременно происходит процесс испарения — таким образом, величина толщины жидкой плёнки становится переменной по высоте поверхности. Толщина плёнки изменяется тем сильнее, чем интенсивнее идёт процесс испарения [10]. В зависимости от высоты изменяются и другие характеристики, такие как расход жидкости, её скорость, линейная массовая плотность орошения, число Рейнольдса. В результате появляется необходимость совместного решения сложной системы уравнений, описывающих процессы испарения жидкой плёнки и её стекания по стенкам насадки.

Современные методы математического моделирования с использованием прикладных программ, обобщённые в работе [11], позволяют получить распределение

параметров в различных гидродинамических средах. В работах [10, 12] представлены некоторые результаты численного моделирования процессов теплообмена в контактных аппаратах.

Помимо особенностей взаимодействия потоков воды и воздуха, процессы теплообмена в насадочных аппаратах существенно зависят от геометрической структуры и теплотехнических характеристик пористых материалов, из которых изготовлена насадка.

В процессе стекания воды по поверхности орошаемой насадки одновременно происходит процесс испарения — таким образом, величина толщины жидкой плёнки становится переменной по высоте поверхности

Для настоящего исследования при участии авторов модернизирована созданная на кафедре теплогазоснабжения и вентиляции СПбГАСУ установка [10].

В качестве теплообменной насадки использована кассета из гидрокопированного материала глубиной 100 мм фирмы Munters. Первые физические исследования и численные эксперименты с использованием прикладной программы StarCCM+ представлены в работе [10]. Однако, учитывая, что подобный численный эксперимент был выполнен впервые и был ограничен по объёму вычислительных процедур, то удалось реализовать численный эксперимент только для исследования одной пластины кассеты.

Реальная кассета состоит из 60 гофрированных листов с длиной волны порядка 17 мм, размещённых поочерёдно под углами к горизонту: 45° вверх и 15° вниз для обеспечения равномерности процесса смачивания и предотвращения отрыва капель.

Рецензия эксперта на статью получена 08.02.2019 [Expert review on the article received February 08, 2019].

УДК 697.932.5. Номер специальности: 05.23.03.

Численное моделирование процесса теплообмена в сотовом увлажнителе

Гари М. Позин, д.т.н., профессор, заслуженный профессор Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна (СПбГУТД); Вера М. Уляшева, д.т.н., доцент, профессор; Никита М. Крышкин, аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)

Представлены результаты численного эксперимента процесса обработки воздуха в установке с кассетой сотового увлажнителя с использованием программы StarCCM+. Использована k-ε-модель турбулентности. Определена величина коэффициента адиабатической эффективности. Данные исследований могут быть использованы для оценки количественных характеристик в аппаратах реальных размеров.

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

UDC 697.932.5. Number of scientific specialty: 05.23.03.

Numerical modeling of heat and mass transfer in the evaporative humidifier

Harry M. Pozin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Professor of the Saint Petersburg State University of Technology and Design (SUTD); Vera M. Ulyasheva, Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Professor; Nikita M. Kryshkin, graduate student, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)

The results of a numerical experiment of the air treatment process in an installation with a cellular humidifier cassette using the StarCCM+ program are presented. The k-ε-turbulence model is used. The value of the adiabatic efficiency coefficient is determined. Research data can be used to assess the quantitative characteristics in the apparatus of real sizes.

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

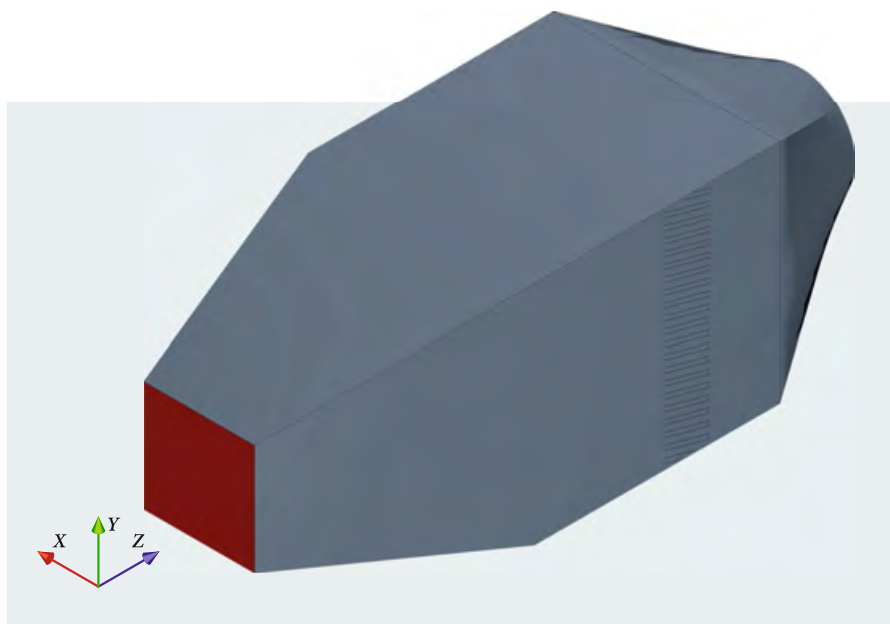


Рис. 1. К построению геометрической модели установки

В данной работе для исследования процесса увлажнения воздуха в установке с тепломассообменной насадкой создана геометрическая 3D-модель (рис. 1) установки в программе SolidWorks. Геометрическая модель орошаемой насадки создана отдельным элементом (рис. 2). Габариты насадки соответствуют размерам установки: 510×510×100 мм.

При создании расчётной сетки за базовый принят размер 20 мм. На входе и выходе воздушного потока из установки сетка сгущается до размера 10 мм. Вблизи пластин орошаемой насадки сетка также сгущается, шаг сетки в пять раз меньше базового размера (4 мм).

Итоговое количество ячеек расчётной сетки — 2816948.

Далее выполнена сборка модели из двух описанных выше деталей в программе SolidWorks. Готовая сборка экспортирована в программу StarCCM+. Последующая работа выполнена в программе StarCCM+ при помощи встроенных автоматических генераторов: генератора призматического слоя, триммера, генератора поверхностной сетки.

Вблизи пластин и вдоль стенок установки созданы призматические слои с параметрами у пластин: толщина призматических слоёв — 12 мм; число призматических слоёв — четыре; коэффициент растяжения призматических слоёв равен 1,3. Параметры призматических слоёв у стенок установки: толщина призматических слоёв — 24 мм; число призматических слоёв — три; коэффициент

Данный численный эксперимент выполнялся впервые и был ограничен непосредственно по объёму вычислительных процедур, поэтому удалось реализовать численный эксперимент только для исследования одной пластины кассеты

растяжения призматических слоёв равен 1,7. Итоговое количество ячеек расчётной сетки — 5 167 824. В сечении канала между пластинами орошаемой насадки в среднем четыре-пять ячеек.

Данное количество является достаточным, но минимальным для формирования достоверной модели движения воздуха в каналах насадки. Создание более подробной расчётной сетки в рамках данной работы не представляется возможным в связи с техническими ограничениями. Указанная выше сетка при расчёте занимает весь максимальный объём оперативной памяти (ОЗУ), обычно доступной на компьютерах для учебного использования.

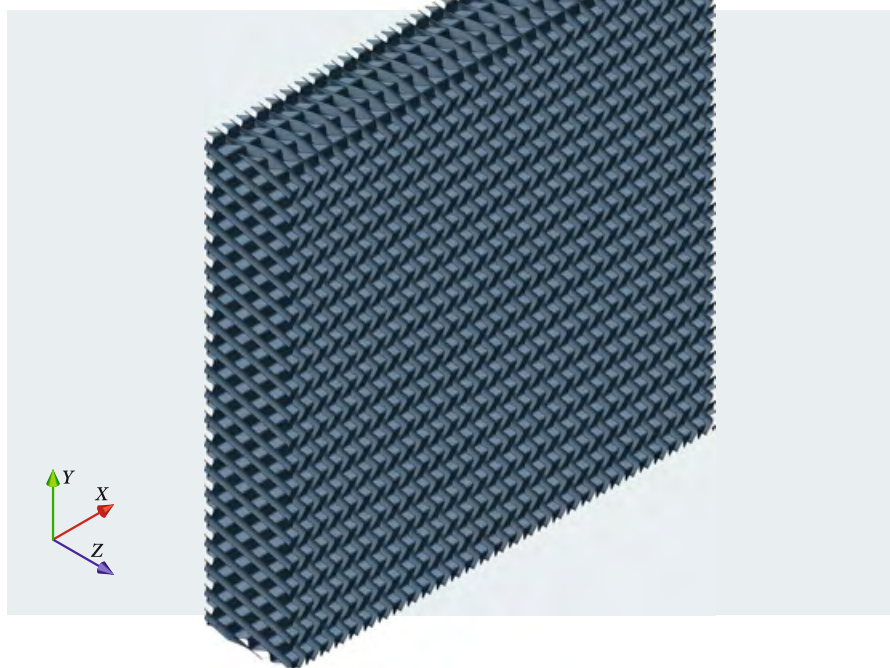
Расчёт более подробной сетки потребует применения производительного серверного оборудования.

Численное моделирование тепломассообменных процессов в насадке сотового увлажнителя основано на расчёте уравнений Рейнольдса для описания турбулентных потоков, дополненных уравнениями конвективно-диффузионного переноса для осреднённой скалярной субстанции $\bar{a}$ (температура T , влагосодержание d):

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{p} \bar{u}_j + \bar{p}' u'_j) = S_m, \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \\ + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial \tau'_{ij}}{\partial x_j} + S_i, \\ \frac{\partial (\bar{p} \bar{a})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{p} \bar{a} \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial (\bar{p} u'_j a')}{\partial x_j} + \bar{J}_a. \end{cases} \quad (1)$$

где t — время; ρ — плотность; μ — коэффициент динамической вязкости; $\bar{u}_j$ — компоненты вектора осреднённой скорости по осям координат; τ'_{ij} — турбулентные напряжения (дополнительные напряжения Рейнольдса); $\bar{u}_i$, $\bar{u}_j$, $\bar{T}$ и $\bar{C}$ — локальные пульсации скорости, температуры и примеси потока; $\bar{a}$ — осреднённые значения удельной плотности скалярной величины; S_m и S_i — интенсивность источников массы и импульса; $\bar{J}_a$ — интенсивность источников примеси.

Рис. 2. К построению геометрической модели тепломассообменной насадки



В работе совместно решаются две различные задачи:

1. Моделируется турбулентное движение воздуха через орошаемую насадку с адiabатическим охлаждением в ней.
2. Моделируется ламинарное движение (стекание) жидкой плёнки под действием гравитационных сил по орошаемой насадке.

Для нестационарного решателя приняты следующие параметры: единичный шаг по времени — 0,1 с; пять итераций на один шаг времени; расчётное время (в зависимости от расхода воздуха, проходящего через установку, причём при большем расходе воздуха сходимость решения наблюдается быстрее — от трёх до пяти секунд)

Для численного расчёта исследуемого процесса приняты следующие характеристики: стационарный режим протекания процесса; сила тяжести; излучение вида «поверхность–поверхность»; тепловое излучение серого тела; уравнение энергии среды для температуры; идеальный газ; многокомпонентный газ; k - ϵ -модель турбулентности; осреднённое по Рейнольдсу уравнение Навье-Стокса.

В качестве граничных условий приняты скорость, температура и относитель-

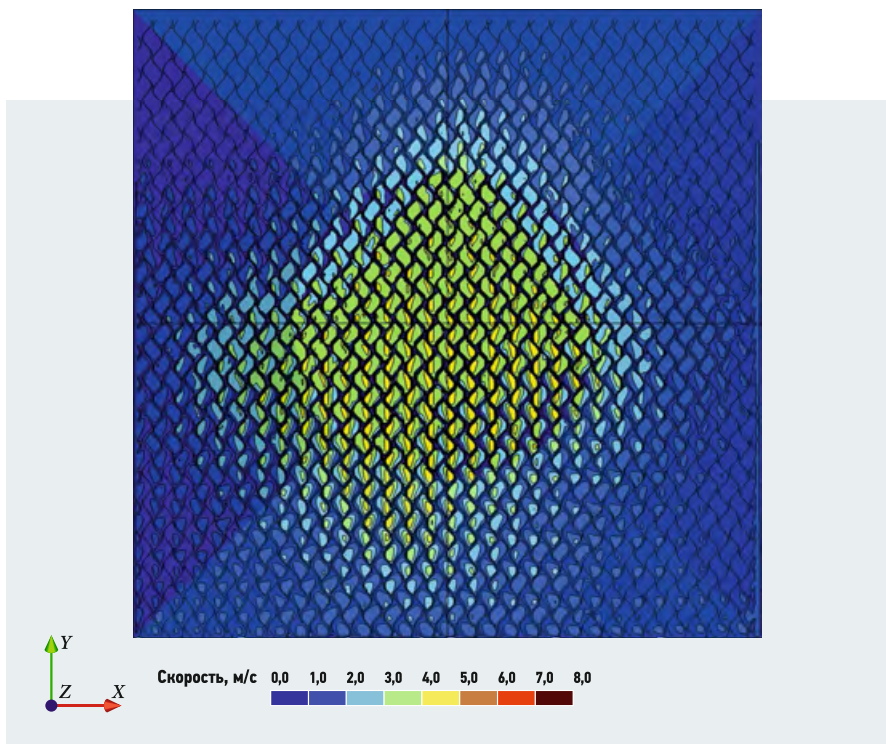


Рис. 4. Скорости движения воздуха в поперечном сечении тепломассообменной насадки

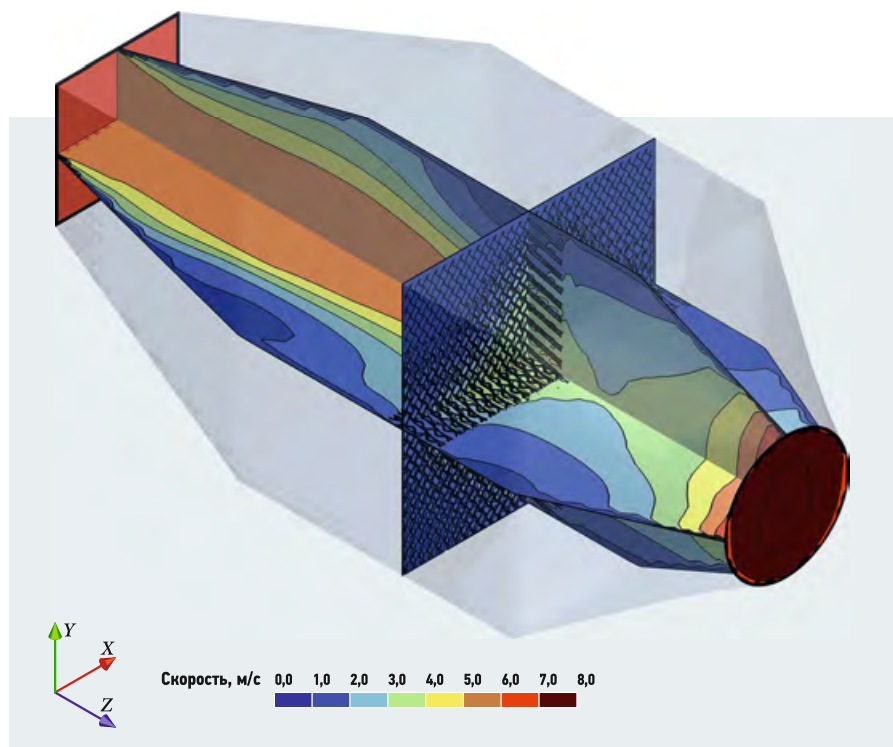


Рис. 3. Распределение скорости движения воздуха в элементах установки

ная влажность воздуха на входе; стационарная температура поверхности стенок установки; температура и относительная влажность воздуха непосредственно на поверхности насадки. При дискретизации расчётной области использована прямоугольная неравномерная сетка, которая сгущается вблизи твёрдых границ согласно закону гиперболического тангенса (алгоритм Винокура). Для учёта особенностей процесса испарения применена Эйлера многофазность. Для нахождения давления насыщения водяных паров использовано уравнение Антуана.

Известно, что на поверхности гигроскопичной насадки при влажностной обработке воздуха образуется стекающая под действием силы тяжести жидкая плёнка. Для нестационарного решателя приняты следующие параметры: единичный шаг по времени — 0,1 с; пять итераций на один шаг времени; расчётное время (в зависимости от расхода воздуха, проходящего через установку, причём при большем расходе воздуха сходимость

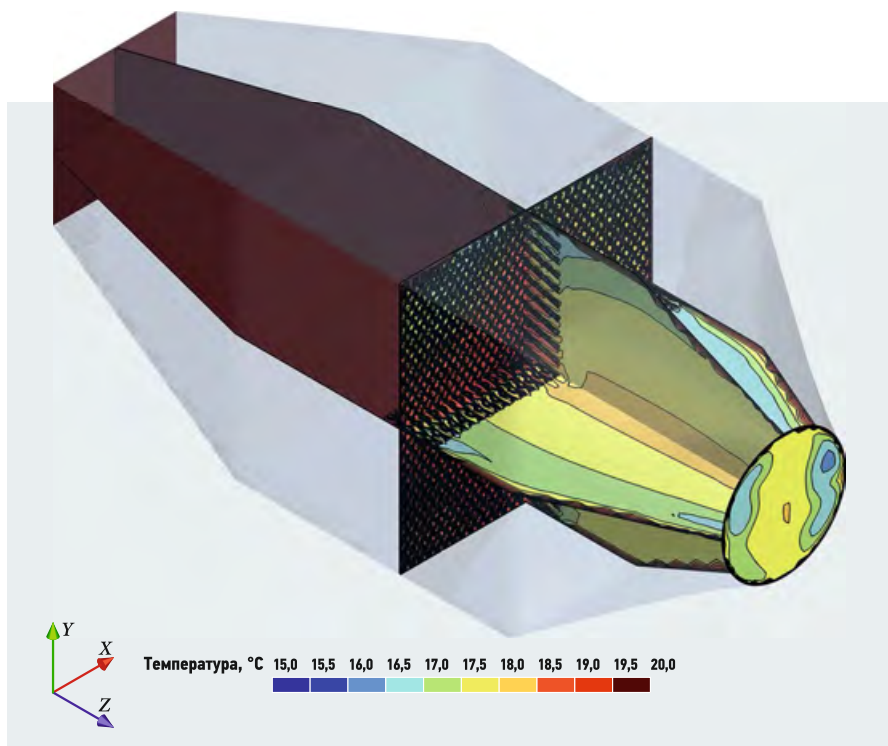


Рис. 5. Распределение температуры воздуха в элементах установки

решения наблюдается быстрее — от трёх до пяти секунд). Время, необходимое для выполнения одной итерации, составило около 70 секунд. Переход от дифференциальных уравнений в частных производных к дискретным осуществлён методом конечных объёмов. При проведении численного эксперимента выполнена оценка сходимости, означающая уменьшение до нуля ошибки численного решения при условии, что размеры контрольных объёмов расчётной области стремятся к нулю.

При скорости воздуха в живом сечении насадки 1,4 м/с, начальной температуре воздуха 20 °С и конечной температуре 17,2 °С, и при температуре воды 15,1 °С получено значение коэффициента адиабатической эффективности 58 %. Результаты расчёта удовлетворительно соответствуют результатам лабораторного эксперимента

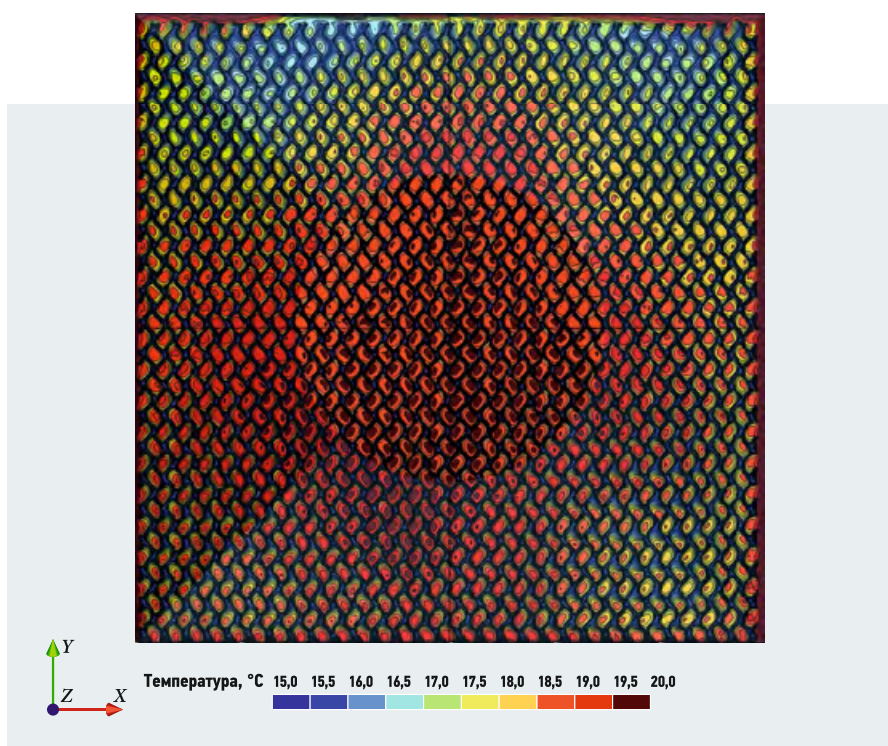


Рис. 6. Распределение температуры воздуха в поперечном сечении тепломассообменной насадки

Расчёт считается законченным, если поведение исследуемых параметров становится стационарным.

Результаты численного эксперимента представлены на рис. 3–6 в виде полей скоростей и температур в характерных секущих плоскостях.

На основании результатов численного эксперимента определены коэффициенты адиабатической эффективности процесса тепломассообмена в орошаемой насадке. Так, при скорости воздуха в живом сечении насадки 1,4 м/с, начальной температуре воздуха 20 °С и конечной температуре 17,2 °С, соответственно, и при температуре воды 15,1 °С получено значение коэффициента адиабатической эффективности 58 %. Результаты расчёта удовлетворительно соответствуют результатам лабораторного эксперимента.

Закключение

На основании разработанной численной модели на базе k - ϵ -модели турбулентности впервые получены характеристики тепломассообменных процессов при испарении жидкой плёнки в сотовом увлажнителе реального размера.

1. Стефанов Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха. — СПб.: АВОК Северо-Запад, 2005. 402 с.
2. Майсоценко В.С. Тепломассообмен в косвенно-испарительных воздухоохладителях регенеративного типа // Промышленная теплотехника, 1987. №2. С. 84–87.
3. Сотников А.Г. Процессы, аппараты и системы кондиционирования воздуха и вентиляции. Том 2. Ч. 2. — СПб.: АТ-Publishing, 2007. 512 с.
4. Кокорин О.Я. Сравнение систем кондиционирования воздуха по показателям энергетической эффективности // АВОК, 2011. №2. С. 46–48.
5. Тарабанов М.Г. Увлажнение воздуха в системах вентиляции и кондиционирования // Инженерные системы. АВОК Северо-Запад, 2009. №3. С. 50–55.
6. Анисимов С.М. Тепломассообмен в аппаратах с пористой насадкой систем кондиционирования воздуха: Дисс. д-ра техн. наук по спец. 05.23.03. — СПб., 1998. 385 с.
7. Аверкин А.Г. Научные основы совершенствования устройств тепловлажностной обработки воздуха в системах кондиционирования: Дисс. д-ра техн. наук по спец. 05.23.03. — Пенза, 2013. 332 с.
8. Королёва Н.А. Разработка энергоэффективных систем кондиционирования воздуха с испарительным охлаждением и адиабатным увлажнением: Дисс. канд. техн. наук по спец. 05.23.03. — Волгоград, 2015. 173 с.
9. 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.
10. Канев М.А. Создание влажностного режима в административных помещениях для северной климатической зоны: Дисс. канд. техн. наук по спец. 05.23.03. — СПб., 2016. 169 с.
11. Гримитлин А.М., Дацок Т.А., Денисихина Д.М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования. — СПб.: АВОК Северо-Запад, 2013. 192 с.
12. Васильев В.Ф., Уляшева В.М., Канев М.А., Рябев Г.А. О применении моделей турбулентности при численном моделировании процессов тепло-, воздухо- и массообмена // Журнал С.О.К., 2016. №12. С. 66–69.

References — see page 94.

Numerical modeling of heat and mass transfer in the evaporative humidifier. Pp. 62–65.

Harry M. Pozin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Professor of the Saint Petersburg State University of Technology and Design (SUTD); **Vera M. Ulyasheva**, Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Professor; **Nikita M. Kryshkin**, graduate student, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)

1. Stefanov E.V. *Ventilacija i kondicionirovanie vozduha* [Ventilation and air conditioning]. Saint Petersburg. *Izd-vo "AVOK Severo-Zapad"* ["Engineers for heating, ventilation, air conditioning, heat supply and construction thermal physics — North-West"] Publishing House]. 2005. 402 s. [In Russian]
2. Majsochenko V.S. *Teplomassoobmen v kosvenno-isparitel'nyh vozduhoohladiteljah regenerativnogo tipa* [Heat and mass transfer in indirect-evaporative air coolers of the regenerative type]. *Promyshlennaja teplotehnika* ["Industrial heat engineering" Magazine]. 1987. Vol. 9. No. 2. Pp. 84–87. [In Russian]
3. Sotnikov A.G. *Processy, apparaty i sistemy kondicionirovanija vozduha i ventiljacii* [Processes, apparatus and systems of air conditioning and ventilation]. Vol. 2. Part 2. Saint Petersburg. 2007. 512 p. [In Russian]
4. Kokorin O.Ja. *Sravnenie sistem kondicionirovanija vozduha po pokazateljam jenergeticheskij jeffektivnosti* [Comparison of air conditioning systems in terms of energy efficiency]. *AVOK* [Non-commercial partnership "Engineers for heating, ventilation, air conditioning, heat supply and construction thermal physics"]. 2011. No. 2. Pp. 46–48. [In Russian]
5. Tarabanov M.G. *Uvlazhnenie vozduha v sistemah ventiljacii i kondicionirovanija* [Air humidification in ventilation and air conditioning systems]. *Inzhenernye sistemy. AVOK Severo-Zapad* [Engineering systems. Non-commercial partnership "Engineers for heating, ventilation, air conditioning, heat supply and construction thermal physics — North-West"]. 2009. No. 3. Pp. 50–55. [In Russian]
6. Anisimov S.M. *Teplomassoobmen v apparatah s poristoj nasadkoj sistem kondicionirovanija vozduha* [Heat and mass transfer in devices with a porous nozzle of air conditioning systems]. Diss. d-ra tehn. nauk po spec. 05.23.03 [The dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty of No. 05.23.03]. Saint Petersburg. 1998. 385 p. [In Russian]
7. Averkin A.G. *Nauchnye osnovy sovershenstvovanija ustroystv teplovlazhnostnoj obrabotki vozduha v sistemah kondicionirovanija* [Scientific basis for improving the devices of heat and moisture treatment of air in air conditioning systems]. Diss. d-ra tehn. nauk po spec. 05.23.03 [The dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty of No. 05.23.03]. Penza. 2013. 332 p. [In Russian]
8. Koroljova N.A. *Razrabotka jenergojeffektivnyh sistem kondicionirovanija vozduha s isparitel'nyim ohlazhdeniem i adiabatyim uvlazhneniem* [Development of energy-efficient air conditioning systems with evaporative cooling and adiabatic humidification]. Diss. kand. tehn. nauk po spec. 05.23.03 [The dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty of No. 05.23.03]. Volgograd. 2015. 173 p. [In Russian]
9. *R 017 NOSTROJ* [The recommendation No. 017 of the National Association of Builders] 2.15.6–2014. *Inzhenernye seti zdaniy i sooruzhenij vnutrennie. Rekomendacii po ustrojstvu jenergojeffektivnyh shem sistem ventiljacii i kondicionirovanija vozduha* [Engineering networks of buildings and structures internal. Recommendations on the device energy-efficient circuits of ventilation systems and air conditioning]. Moscow. *Izd-vo "BST"* ["Bulletin of Construction Equipment"] Publishing House]. 2014. 114 p. [In Russian]
10. Kanev M.A. *Sozdanie vlazhnostnogo rezhima v administrativnyh pomeshhenijah dlja severnoj klimaticheskoy zony* [Creating a humidity regime in administrative premises for the northern climatic zone]. Diss. kand. tehn. nauk po spec. 05.23.03 [The dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty of No. 05.23.03]. Saint Petersburg. 2016. 169 p. [In Russian]
11. Grimitlin A.M., Dacjuk T.A., Denisihina D.M. *Matematicheskoe modelirovanie v proektirovanii sistem ventiljacii i kondicionirovanija* [Mathematical modeling in the design of ventilation and air conditioning]. Saint Petersburg. *AVOK Severo-Zapad* [Publishing House of the Non-commercial partnership "Engineers for heating, ventilation, air conditioning, heat supply and construction thermal physics — North-West"]. 2013. 192 p. [In Russian]
12. Vasil'ev V.F., Ulyasheva V.M., Kanev M.A., Rjabev G.A. *O primenenii modelej turbulentnosti pri chislennom modelirovanii processov teplo-, vozduho- i massoobmena* [On the use of turbulence models in the numerical simulation of the processes of heat, air and mass transfer]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (S.O.K.)* [Journal of Plumbing. Heating. Ventilation]. 2016. No. 12. Pp. 66–69. [In Russian]