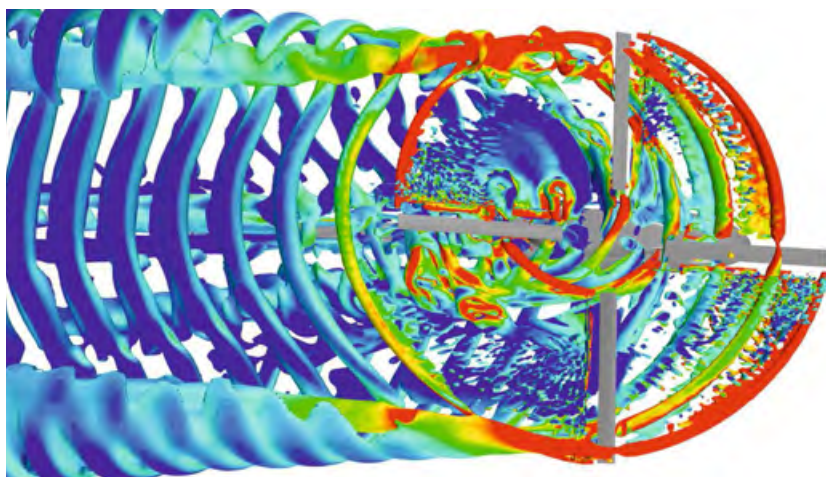




© 2010 Siemens AG, <http://mdx.plm.automation.siemens.com>

О применении моделей турбулентности при численном моделировании процессов тепло-, воздухо- и массообмена

Исследованиям вентиляционных процессов в помещениях и теплообмену в контактных аппаратах систем кондиционирования воздуха посвящено значительное количество работ отечественных и зарубежных авторов, в частности [1–3].

Современный уровень разработанных программных продуктов, таких как ANSYS, Star-CD и Star-CCM+, Fluent, позволяет осуществлять численное моделирование достаточно сложных тепло-массообменных и гидродинамических процессов, в том числе и в области вентиляции и кондиционирования воздуха.

Основой численного исследования турбулентных воздушных потоков в помещениях с источниками выделений теплоты и примеси является система дифференциальных уравнений энергии, неразрывности, сохранения импульса в виде Навье-Стокса и примеси:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \\ + g \beta (T - T_0) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\bar{u}_i' \bar{u}_j') \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\bar{T} \bar{u}_j') \\ \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{C}}{\partial x_j} = \frac{\partial (-\bar{u}_j' \bar{C}')}{\partial x_j} + J_c, \end{cases} \quad (1)$$

где t — время; ρ — плотность; $\bar{u}_j$ — компоненты вектора осреднённой скорости по осям координат; ν — коэффициент кинематической вязкости; $(T - T_0)$ — отклонение фактической температуры от фиксированной средней; $\beta = T^{-1}$ — коэффициент теплового расширения воздуха; $\bar{P}$, $\bar{T}$ и $\bar{C}$ — осреднённые давление, температура и концентрация примеси; $\bar{u}_i' \bar{u}_j' = \tau_{ij}/\rho$, где τ_{ij} — турбулентные напряжения (дополнительные напряжения Рейнольдса); $\rho c_p \bar{u}_j' T'$ и $\bar{u}_j' C'$ — дополнительные тепловой поток и поток массы; $\bar{u}_i'$, $\bar{u}_j'$, T' и C' — локальные пульсации скорости, температуры и примеси потока; J_c — интенсивность источника примеси.

При численном моделировании течений вязких жидкостей выделяют два главных подхода (табл. 1): прямое численное моделирование (DNS) — решение полных уравнений Навье-Стокса; моделирование с использованием осреднённых уравнений Навье-Стокса, а именно — по времени (RANS), по пространству (LES), гибридные модификации (DES).

Анализ табл. 1 и результатов исследований других авторов показывает [4], что в основном для решения прикладных задач гидроаэродинамики используются методы на основе использования модификаций методов SRANS и URANS с применением различных полуэмпирических моделей турбулентности, а также метод DES, также основанный на этих методах.

УДК 697.95:519.87

О применении моделей турбулентности при численном моделировании процессов тепло-, воздухо- и массообмена

В. Ф. Васильев, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой; **В. М. Уляшева**, д.т.н., доцент, профессор; **М. А. Канев**, к.т.н., ассистент; **Г. А. Рябев**, аспирант, кафедра теплогазоснабжения и вентиляции, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (СПбГАСУ)

Представлены результаты численного моделирования вентиляционных процессов в помещениях и аппаратах обработки приточного воздуха при использовании моделей турбулентности Спаларта-Аллармеса (SA) и k-ε, а также метода LES. Выполнено обоснование применения различных моделей турбулентности. Приведён анализ результатов расчёта и экспериментальных данных.

Ключевые слова: микроклимат, численный метод, модели турбулентности, увлажнитель воздуха, жидкая плёнка.

UDC 697.95:519.87

On the application of turbulence models in numerical modeling processes of heat, air and mass transfer

V. F. Vasiliev, PhD, Associate Professor, Head of the Department; **V. M. Ulyasheva**, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor; **M. A. Kanev**, PhD, assistant; **G. A. Ryabev**, PhD student, the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbSUACE)

Numerical simulation results of the ventilation process in premises and apparatus supply air processing of using turbulence Spalart-Allmaras (SA) model, the k-ε model and LES method are presented. Justification for the use of different turbulence models is performed. The comparison analysis of the Numerical simulation results with the experimental data is given.

Keywords: microclimate, numerical computing, turbulence models, air humidifier, liquid film.

Как известно, при решении уравнений Навье-Стокса моделирование турбулентности остаётся основной проблемой [4]. В настоящее время созданы различные модели турбулентности, основные положения наиболее распространённых приведены в табл. 2. Классификация моделей турбулентности основана порядке замыкания (число дополнительных дифференциальных уравнений в частных производных), которое изменяется в пределах 0–12.

Модификации модели Спаларта-Аллмареса (SA) содержат одно дифференциальное уравнение для модифицированной кинематической турбулентной вязкости $\tilde{\nu}$:

$$\frac{D\tilde{\nu}}{Dt} = P^{\nu} - D^{\nu} + \frac{1}{\sigma} \left\{ \nabla[(\mathbf{v} + \tilde{\mathbf{v}})] \nabla \tilde{\nu} + c_{b2} [(\nabla \tilde{\mathbf{v}})(\nabla \tilde{\mathbf{v}})] \right\} + f_{t1} \Delta U^2, \quad (2)$$

где P^{ν} , D^{ν} — генерационный и диссипативный члены; $f_{t1} \Delta U^2$ — член, предназначенный для инициирования ламинарно-турбулентного перехода; σ и c_{b2} — эмпирические константы модели; ΔU — модуль разности векторов скорости.

Модели k - ϵ включают формулу Колмогорова-Прандтля для турбулентной вязкости, уравнения переноса кинетической энергии турбулентных пульсаций и скорости её диссипации. Кинематическая турбулентная вязкость определяется по формуле:

$$\nu_t = C_{\mu} f_{\mu} k^2 \epsilon. \quad (3)$$

Современный уровень развития ПО позволяет осуществлять численное моделирование достаточно сложных тепломассообменных и гидродинамических процессов. Основой численного исследования турбулентных воздушных потоков в помещениях с источниками выделений теплоты и примеси является система диффузоров энергии, неразрывности и сохранения импульса в виде Навье-Стокса и примеси

Кинетическая энергия турбулентности выражается формулой:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]. \quad (4)$$

Степень диссипации турбулентности:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} f_1 \tau_{ij} \frac{\epsilon}{k} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} f_2 \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_{\epsilon}} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right]. \quad (5)$$

Коэффициенты замыкания:

$$C_{\epsilon 1} = 1,44; C_{\epsilon 2} = 1,92; C_{\mu} = 0,09; \sigma_k = 1,0; \sigma_{\epsilon} = 1,3.$$

В методе LES (моделирование крупных вихрей) используются два предпо-

ложения: возможность разделения поля скорости на движение крупных и мелких вихрей; аппроксимация нелинейных взаимодействий между крупными и мелкими вихрями.

Для исследования состояния воздушной среды в помещениях (производственный цех с источниками тепловыделений, офисное помещение) использован программный комплекс Star-CD, при этом в качестве примеси принято влажосодержание воздуха [2]. Для перехода от дифференциальных уравнений к дискретным использован метод конечных объёмов на структурированной неортогональной несмещённой сетке. Традиционно расчётная сетка сгущается в окрестностях твёрдых границ. Аппроксимация конвективных членов уравнений (1) выполнена по противоточной схеме первого порядка точности. Коррекция давления проведена по алгоритму SIMPLEC. В качестве граничных условий для скоростей воздуха на стенках заданы, как обычно, условия «прилипания». На поверхностях, через которые имеет место поток теплоты, приняты плотности потока теплоты. В приточных отверстиях заданы скорость, температура и влажосодержание воздуха.

Для оценки целесообразности применения метода LES, моделей турбулентности Спаларта-Аллмареса (SA) и стандартной k - ϵ выполнено сопоставление результатов расчёта с использованием вышеуказанных методов.

Методы моделирования турбулентных течений

табл. 1

Полное наименование метода	Наименование в англоязычной литературе	Число узлов сетки	Область применения в настоящее время	Характерные особенности методов
Прямое численное моделирование	Direct Numerical Simulation (DNS)	10^{16}	Расчёт течений с достаточно низкими числами Рейнольдса	Решение нестационарных уравнений Навье-Стокса
Моделирование с использованием осреднённых уравнений Навье-Стокса	По времени	Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)	Решение широкого круга гидродинамических задач	Использован в современных программных продуктах
	По пространству	Large Eddy Simulation (LES)	Расчёт метеорологических задач, аэроакустики, турбулентных химических течений	LES с пристеночным RANS-моделированием
	Гибридные модификации	Detached-Eddy Simulation (DES)	Решение широкого круга гидродинамических задач	Сочетание методов LES (отрывные течения) и RANS («гладкий» поток)

Характеристика некоторых моделей турбулентности

табл. 2

Наименование модели	Отличительная особенность	Область применения	Примечание
Алгебраические модели	Прандтля	Аналогия пути смешения в потоке и длины свободного пробега молекул	Тонкие вязкие слои
	Болдуина-Ломакса	Различное соотношение вязкости	Отрывные течения
Однопараметрические модели	ν_t -92 (модель А. Н. Гуляева, В. Е. Козлова, А. Н. Секундова)	Четыре постоянные и предполагаемое задание масштаба турбулентности	Сдвиговые течения
	SA-модель и SARC, SACC (разновидности модели Спаларта-Аллмареса)	Одно дифференциальное уравнение для турбулентной вязкости	Задачи внешней аэродинамики
Двухпараметрические модели	k - ϵ -модели: Лаундера-Шармы	Включают кинетическую энергию турбулентности и скорость её диссипации	Сдвиговые течения, различные инженерные задачи
	k - ω -модели: Уилкокса (Вилкокса) и Ментера	Включают кинетическую энергию турбулентности и удельную по объёму скорость её диссипации	Потоки с твёрдыми стенками
	Shear Stress Transport или SST (модель Ментера — комбинация k - ω и k - ϵ -моделей)	—	Отрывные течения, течения при необходимости учёта градиента давления, эжекция потоков

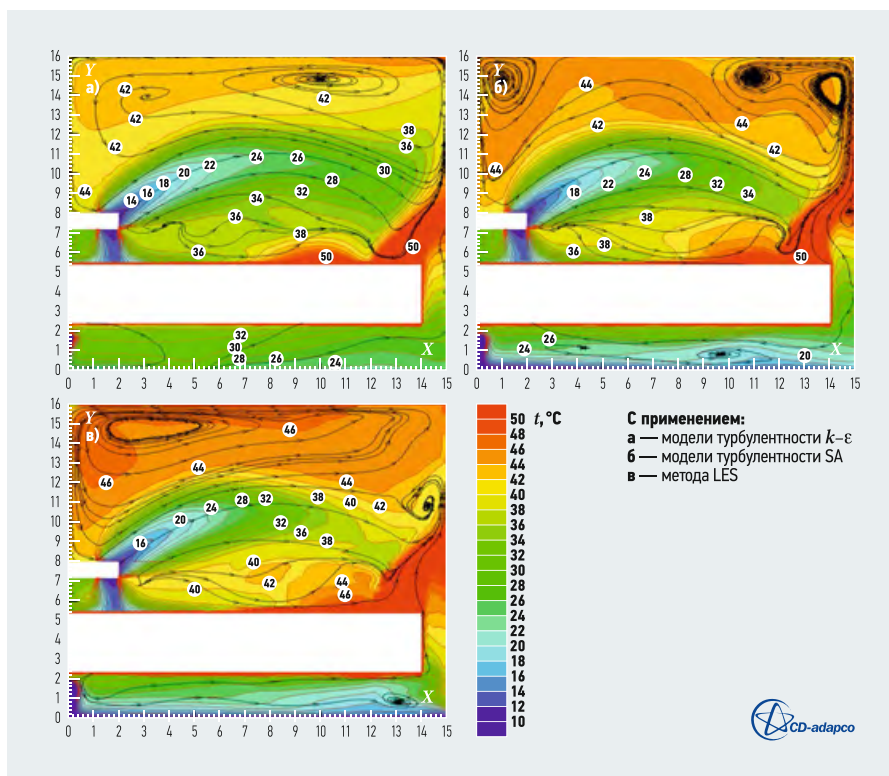


Рис. 1. Распределение температуры воздуха по результатам численного расчёта с применением различных моделей турбулентности и метода LES

На рис. 1 показаны поля распределения температуры воздуха для одного из наиболее характерных сечений производственного помещения. Имеется удовлетворительная сходимость данных полей для любого сечения, причём при применении модели турбулентности SA сокращается трудоёмкость, и для дальнейшего численного моделирования принята модель турбулентности Спаларта-Алмареса. Для оценки адекватности численного исследования процессов тепло- и воздухообмена в помещениях с источниками тепловыделений использованы результаты натурных исследований. Представленные на рис. 2 и 3 результаты численного расчёта удовлетворительно коррелируют с экспериментальными данными.

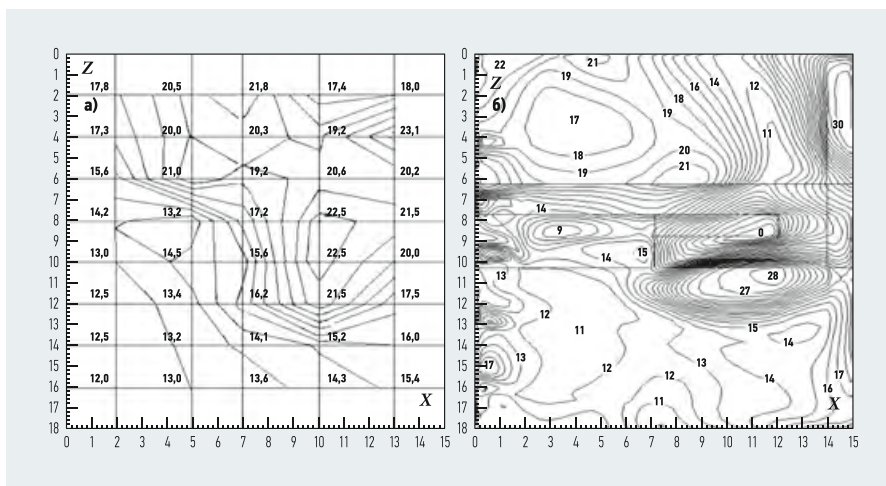


Рис. 2. Температура воздуха в рабочей зоне производственного помещения в холодный период года (а — по экспериментальным данным, б — по результатам численного моделирования)

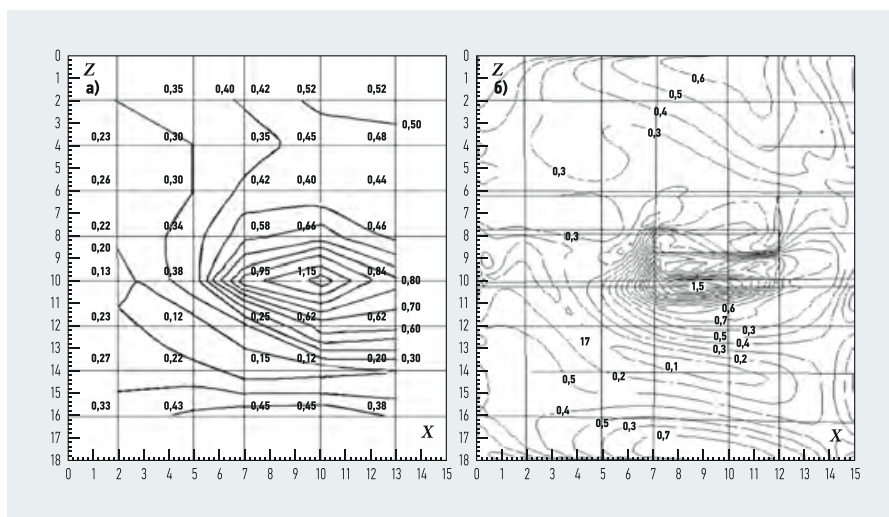


Рис. 3. Скорость движения воздуха в рабочей зоне производственного помещения в холодный период года (а — по экспериментальным данным, б — по результатам численного моделирования)

Для расчёта тепломассообменных процессов в насадке сотового увлажнителя использованы уравнения Рейнольдса для описания турбулентных потоков, дополненные уравнениями конвективно-диффузионного переноса для осреднённой скалярной субстанции $\bar{a}$ (температура, водяной пар) аналогично системе (1):

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_j + \bar{\rho}' u_j') = S_m \\ \rho \left(\frac{\bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \\ + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_j}{\partial x_i^2} \right) + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_i \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{a})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_j \bar{a})}{\partial x_j} = - \frac{\partial (\bar{\rho} u_j' a')}{\partial x_j} + \bar{J}_a, \end{cases} \quad (6)$$

где μ — коэффициент динамической вязкости; $\bar{a}$ — осреднённые значения удельной плотности скалярной величины; S_m и S_i — интенсивность источников массы и импульса; $\bar{J}_a$ — интенсивность источников примеси.

Рассматриваемая задача решена с использованием ПО Star-CCM+ [3]. На рис. 4 приведена расчётная сетка модели канала с кассетой, причём сетка существенно сгущается вблизи поверхностей испарения увлажнителя. На рис. 5 показан фрагмент поверхности испарения. По поверхности насадки под действием силы тяжести стекает жидкая плёнка толщиной 1 мм. На каждый шаг по времени принято по пяти итераций. Для перехода от дифференциальных уравнений к дискретным применён метод конечных объёмов. При решении задачи использована k - ϵ -модель турбулентности. Расчёт выполнен при: температуре воздуха на входе в канал 24°C и влагосодержании 4,16 г/кг; температуре подаваемой воды в увлажнитель — 16°C.

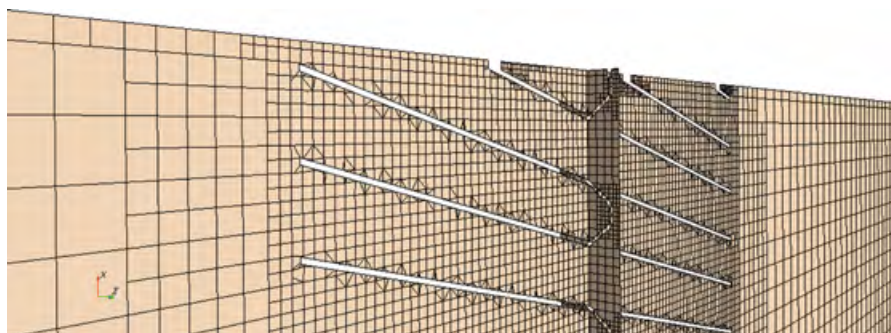


Рис. 4. Расчётная сетка канала с кассетой для увлажнения

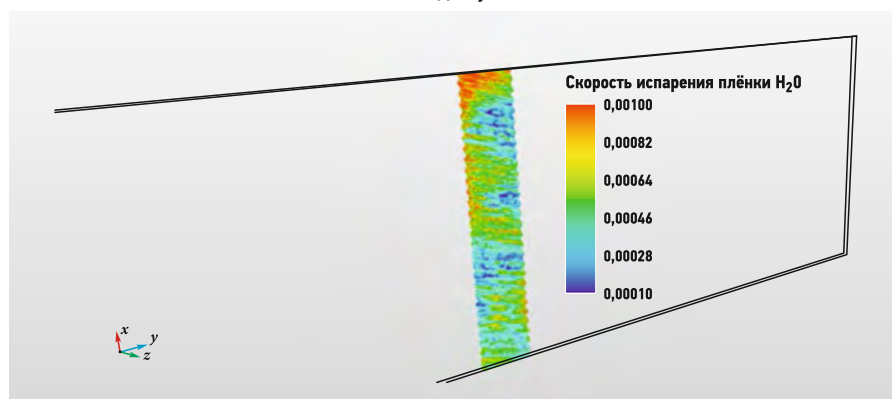


Рис. 6. Распределение интенсивности испарения, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

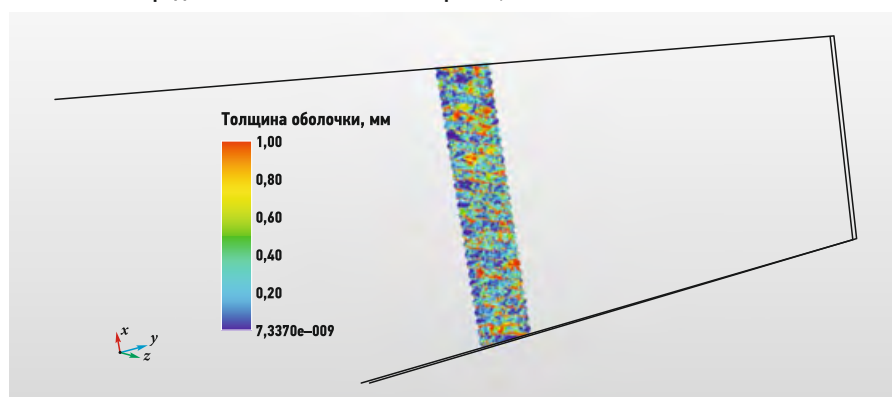


Рис. 7. Изменение толщины плёнки

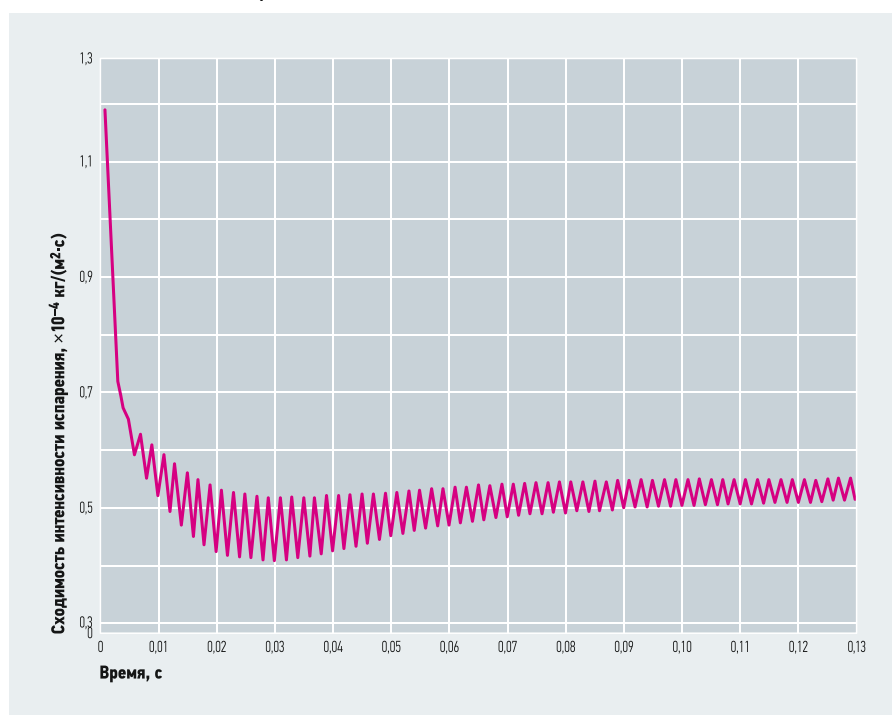


Рис. 8. Изменение сходимости интенсивности испарения по времени

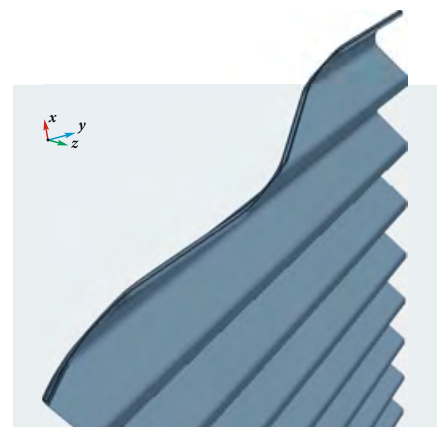


Рис. 5. Фрагмент орошаемой насадки

На рис. 6 и 7 показаны некоторые результаты численного моделирования. Распределение интенсивности испарения и изменение толщины плёнки позволяют сделать вывод о нестационарном характере процесса испарения по высоте пластины и получить количественные характеристики. Для оценки сходимости численного эксперимента выполнен мониторинг отслеживаемых параметров, удовлетворительные результаты которого для интенсивности испарения показаны на рис. 8.

Распределение интенсивности испарения и изменение толщины плёнки позволяют сделать вывод о нестационарном характере процесса испарения по высоте пластины и получить количественные характеристики

Выводы

Получена удовлетворительная сходимость результатов расчёта параметров воздуха в производственном помещении с источниками теплоты при использовании метода LES, моделей турбулентности SA и $k-\epsilon$. Доказана целесообразность использования однопараметрической модели турбулентности для исследования тепло- и воздухообмена в помещениях. Для расчёта тепломассообменных процессов в контактных аппаратах обработки точного воздуха адекватные результаты получены при применении $k-\epsilon$ -модели.

1. Гримитлин А.М., Дацюк Т.А., Денисихина Д.М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования. — СПб.: АВОК Северо-Запад, 2013. 192 с.
2. Позин Г.М., Уляшева В.М. Распределение параметров воздуха в помещениях с источниками тепловыделений // Инженерно-строительный журнал, 2012. №6(32). С. 42–47.
3. Канев М.А. Численное моделирование процесса испарения в соевом увлажнителе // Электрон. науч. журнал «Современные проблемы науки и образования». 2015. №2. Режим доступа: science-education.ru/122-20735 (дата обращения: 23.07.2015).
4. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчётах сложных течений. — СПб.: Изд-во СПбПУ, 2012. 88 с.

* References — see page 94.

On the issue of turbulence models in numerical modeling processes of heat, air and mass transfer. Pages 66–69.

V. F. Vasiliev, PhD, Associate Professor, Head of the Department; **V. M. Ulyasheva**, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor; **M. A. Kanev**, PhD, assistant; **G. A. Ryabev**, PhD student, the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbSUACE)

1. Grimitdin A.M., Datsuk T.A., Denisihina D.M. Matematicheskoe modelirovanie v proektirovanii sistem ventiljacii i kondicionirovanija [Mathematical modeling in the design of ventilation and air conditioning systems]. Saint-Petersburg. Izdatel'stvo "AVOK Severo-Zapad" ["AVOK North-West" Publishers]. 2013. 192 p.
2. Pozin G.M., Ulyasheva V.M. Raspredelenie parametrov vozduha v pomeshhenijah s istochnikami teplovydelenij [The distribution parameters of air in rooms with heat sources]. Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal [Magazine of civil engineering]. 2012. Vol. 32. No. 6. Pp. 42–47.
3. Kanev M.A. Chislennoe modelirovanie processa isparenija v sotovom uvlazhnitele [Numerical simulation of an evaporation process in the evaporative cell humidifier]. Jelektronnyj nauchnyj zhurnal "Sovremennye problemy nauki i obrazovanija" ["Modern problems of science and education", the digital scientific magazine]. 2015. No. 2. Web-source science-education.ru/122-20735.
4. Garbaruk A.V., Strelec M.X., Shur M.L. Modelirovanie turbulentnosti v raschetah slozhnyh techenij [Modeling of turbulence in the calculation of complex flows]. Saint-Petersburg. Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo politicheskogo universiteta imeni Petra Velikogo (SPbPU) ["Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbSTU)" Publishers]. 2012. 88 p.