



Численное моделирование вентиляции спа-центра

Введение

Одним из важных приоритетных направлений политики России является сохранение и укрепление здоровья граждан, в том числе благодаря строительству новых спортивных комплексов и спа-центров. Общие требования по проектированию спортивных сооружений, в том числе к системам обеспечения микроклимата, представлены в ряде нормативных документов — СП 332.1325800.2017, СП 31-112-2007, СП 310.1325800.2017, СП 31-113-2004, Р НП «АВОК» 7.1-2020. Разработаны и обобщены методы инженерных расчётов теплового, влажностного и воздушного режимов бассейнов и ледовых арен, в частности, в работах [1–2]. В [3–4] предложены также способы учёта влияния лучистого теплообмена.

Для повышения эффективности проектных решений в настоящее время уже недостаточно использовать общепризнанные интегральные (балансовые) методы расчёта воздухообменов для обеспечения комфортных параметров микроклимата или эмпирические зависимости для расчёта струйных течений при выборе способов воздухораспределения. Для всесторонней оценки проектных решений в области вентиляции необходимо иметь возможность проанализировать

ситуацию в целом, то есть оценить пространственную неоднородность в распределении температуры, скорости и влажности воздуха в общественных и производственных помещениях, имеющих сложную геометрию и тепло-, влаго- и газовыделения.

В последние годы широкое распространение получили методы численного моделирования вентиляционных процессов с использованием различных гидродинамических программных комплексов. Их реализация позволяет проанализировать пространственное распределение параметров микроклимата для проектного варианта организации воздухообмена и выбранных способов подготовки воздуха, а также оценить их соответствие требованиям нормативных документов. Это особенно важно, поскольку в редких случаях есть возможность выполнить проверку принятых инженерных решений в натурных условиях [5, 6].

Воздушный режим в помещениях специального назначения с большим количеством людей формируется за счёт совокупности турбулентных приточных струй, взаимодействующих с менее активными течениями вблизи вытяжных отверстий, ниспадающими потоками вблизи холодных поверхностей и конвек-

Рецензия эксперта на статью получена
18.06.2024 [The expert review of the article
was received on June 18, 2024]

УДК 697.953. Научная специальность: 2.1.3.

Численное моделирование вентиляции спа-центра

Т.А. Дацюк, д.т.н., профессор; **А.М. Гримитлин**, д.т.н., профессор; **В.Р. Таурит**, д.т.н., профессор; **Ю.В. Иванова**, к.т.н., доцент, старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)

Представлены результаты численного моделирования параметров микроклимата на примере организации воздушного режима спа-центра. Рассмотрены особенности формирования исходных данных для численного эксперимента, в частности, характеризующих тепловлажностный режим помещений с открытой водной поверхностью. Проанализирован выбор модели турбулентности при использовании программного комплекса STAR-CCM+. Изучены проблемы, возникающие при анализе частных решений с точки зрения сравнения с требованиями нормативных документов. Предложены рекомендации для использования результатов численного моделирования при корректировке проектных решений.

Ключевые слова: численное моделирование, воздушный режим, тепло-массообмен, турбулентные течения, воздухообмен, спа-центр, открытая водная поверхность

UDC 697.953. The number of scientific specialty: 2.1.3.

Numerical simulation of spa ventilation

T.A. Datsyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor; **A.M. Grimitlin**, Doctor of Technical Sciences, Professor; **V.R. Taurit**, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Ju.V. Ivanova**, PhD, Associate Professor, senior lecturer, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)

The results of numerical modeling of microclimate parameters are presented using the example of organizing the air regime of a spa. The features of the formation of initial data for a numerical experiment are considered, in particular, those characterizing the heat and humidity regime of rooms with an open water surface. The choice of a turbulence model using the STAR-CCM+ software package is analyzed. The problems that arise when analyzing private solutions from the point of view of comparison with the requirements of regulatory documents are studied. Recommendations are proposed for using the results of numerical modeling when adjusting design solutions.

Keywords: numerical modeling, air regime, heat and mass transfer, turbulent flows, air exchange, spa, open water surface.

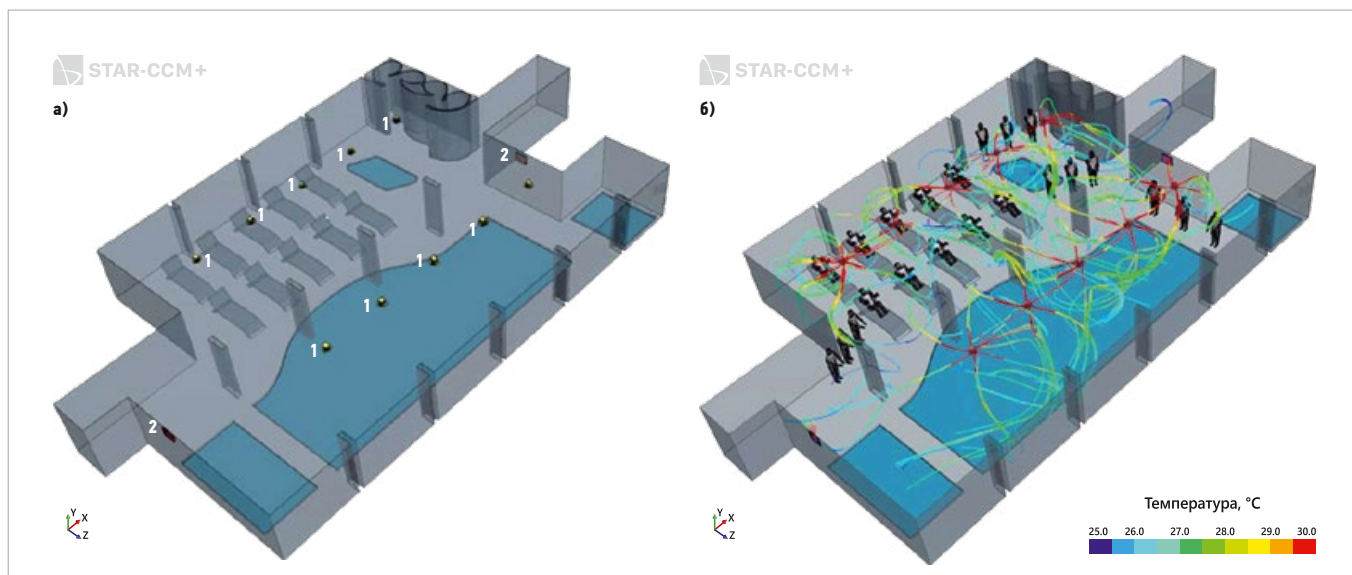


Рис. 1. Размещение вентиляционных устройств и циркуляционные течения в зоне отдыха спа-центра [а — модель спа-центра (1 — приточные диффузоры; 2 — вытяжная решётка), б — траектории струйных течений от воздухораспределителей]

тивными течениями от источников тепловыделений. Вследствие такой сложной картины движения воздуха оценить пространственное распределение параметров микроклимата возможно только с использованием методов математического моделирования. В значительной степени это относится и к обеспечению стационарных комфортных условий в спа-центрах с открытой водной поверхностью, где скорость воздушного потока не должна превышать 0,1 м/с, а относительная влажность — 60%.

Методы

В статье использовано численное моделирование для организации комфортных условий в спа-центре.

Численное моделирование тепломассообмена и аэродинамики вентиляционных процессов основано на решении системы дифференциальных уравнений в частных производных Навье — Стокса, неразрывности, энергии и примесей [7–9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_i + \bar{\rho}' u_i') &= S_m; \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \tau} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) &= -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \\ &+ \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_i; \\ \frac{\partial (\bar{\rho} a)}{\partial \tau} + \frac{\partial (\bar{\rho} a u_i)}{\partial x_j} &= -\frac{\partial (\bar{\rho} u_i a')}{\partial x_j} + \bar{J}_a, \end{aligned}$$

где τ — время; ρ — плотность; μ — коэффициент динамической вязкости; $\bar{u}_i$ — 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.

Достоверность получаемой методом моделирование информации о распределении параметров микроклимата зависит от выбора модели турбулентности [8]. Наиболее часто при использовании сертифицированных гидродинамических пакетов для расчёта турбулентных течений

применяется модель турбулентности $k-\epsilon$ или более поздние её модификации. Модели этой группы, к сожалению, не всегда обеспечивают необходимую для практики точность при изучении турбулентных течений вблизи твёрдых поверхностей со сложной геометрией или при больших размерах расчётной области. Поэтому проводятся оценочные расчёты, направленные на выбор модели турбулентности.

Этапы расчёта, таким образом, сводятся к следующему:

- описание всех геометрических особенностей вентилируемого объекта и построение трёхмерных моделей, например, в программном комплексе SolidWorks (рис. 1а);
- разработка и построение расчётной сетки, причём количество ячеек должно быть достаточным для получения достоверного решения и выявления тонких структур течения (последнее достигается измельчением расчётной сетки в критических областях);
- корректная формулировка граничных условий для решаемой задачи;
- выбор одной из полуэмпирических моделей турбулентности для решения рассматриваемой задачи и обоснование её применения.

Расчёты, приведённые в статье, выполнены в программном комплексе Siemens STAR-CCM+ версии 13.02.011-R8, в качестве модели турбулентности принята модель $k-\omega$. В этой модели вместо уравнения для ϵ используется уравнение удельной скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ω . Применение модели $k-\omega$ позволяет получить более точные результаты, так как учитывается влияние малых чисел Re [4].

Расчёты, приведённые в статье, выполнены в программном комплексе STAR-CCM+, в качестве модели турбулентности принята модель $k-\omega$. В этой модели вместо уравнения для ϵ используется уравнение удельной скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ω



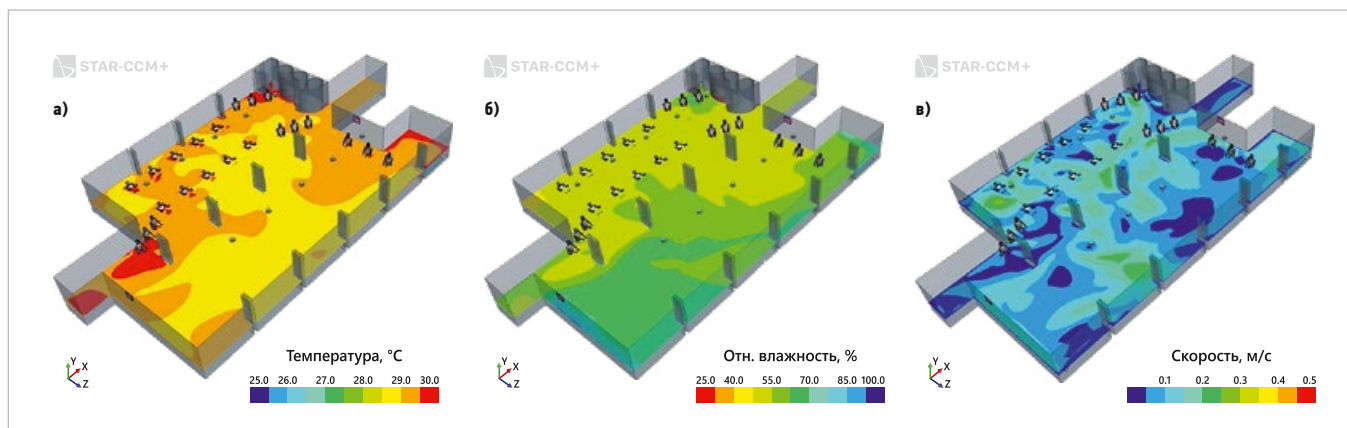


Рис. 2. Распределение параметров микроклимата в обслуживаемой зоне спа-центра (а — поле температуры, б — поле относительной влажности, в — поле подвижности воздуха)

Результаты и обсуждение

В общем случае для различных периодов года необходимо рассчитать достаточно много вариантов организации воздухообмена и воздухораспределения, учитывая особенности размещения всех объектов, влияющих на распределение параметров воздуха в помещении, особенно при наличии открытой водной поверхности.

Спа-центры характеризуются разнообразием как объёмно-планировочных, так и технологических решений. Для любых проектных решений важно исключить конденсацию влаги, особенно на светопрозрачных конструкциях. Подачу воздуха рекомендуется осуществлять через систему приточной вентиляции, совмещённой с воздушным отоплением, на уровне пола вертикальными струями вдоль наиболее холодных поверхностей. В зависимости от объёмно-планировочных решений возможны особые требования с точки зрения устройства системы отопления, воздушного баланса, утилизации теплоты и осушения удаляемого воздуха.

Однако применение общих рекомендаций, к сожалению, недостаточно для создания комфортных условий в зонах отдыха. Основной проблемой в помещении спа-центра является обеспечение в зоне отдыха скорости движения воздуха 0,1 м/с, относительной влажности до 60 % и концентрации CO_2 , не превышающей 600 ppm.

Для организации воздухообмена в помещении спа-центра, включающем джакузи, взрослый и детский бассейны, использована потолочная подача приточного воздуха с использованием воздухораспределителей фирмы «Арктос» (рис. 16), формирующих веерные струи.

При расчёте граничные условия учитывали тепло- и влагопоступления от людей, водных и смоченных поверхностей, а также количество выделяющегося углекислого газа.

Результаты численного моделирования (рис. 2) показывают, что при выбранной схеме вентиляции и типе воздухораспределителей практически все параметры соответствуют нормируемым значениям. В зоне пребывания людей температура воздуха колеблется в диапазоне от 28,5 до 30 °С, что соответствует условиям комфортности для спа-центров (рис. 2а). Поле относительной влажности воздуха в зоне отдыха однородно, значения не превышают 60 % (рис. 2б). Однако выявлены зоны с подвижностью воздуха от 0,2 до 0,3 м/с (рис. 2в). Низкие скорости (0 м/с) также не относятся к оптимальным значениям, поскольку это связано с образованием застойных зон.

В результате анализа расчётных вариантов разработаны рекомендации по регулированию расхода и направления потоков приточного воздуха. Например, было предложено изменить расположение приточных диффузоров, переместив один из них в зону расположения детского бассейна для повышения температуры воздуха в этой зоне.

Заключение

Объекты, характеризующиеся проблемами при создании микроклимата, к числу которых, несомненно, относятся спа-центры, ледовые арены, плавательные бассейны и зрительные залы, подлежат обязательному математическому моделированию термодинамического состояния внутреннего воздуха для оценки соответствия нормируемым параметрам.

Разработаны рекомендации по регулированию расхода и направления потоков приточного воздуха. Предложено изменить расположение приточных диффузоров, переместив один из них в зону детского бассейна

Результаты численного моделирования состояния воздушной среды в виде полей распределения температуры, скорости воздуха, относительной влажности и концентраций вредных веществ в характерных зонах помещения позволяют выполнить анализ целесообразности выбранных схемы организации воздухообмена и устройств распределения воздуха в рассматриваемом здании.

При несоответствии параметров возможны различные варианты корректировки проектных решений, разработка программы наладочных работ систем вентиляции или регламента обслуживания систем, а также разработка новых проектных решений. ●

1. Краснов Ю.С. Системы вентиляции и кондиционирования. Рекомендации по проектированию для производственных и общественных зданий. — М.: Термокул, 2006. 288 с.
2. Тарабанов М.Г. Кондиционирование воздуха. Ч. 1. — М.: АВОК-Пресс, 2015. 212 с.
3. Уляшева В.М., Иванова Ю.В., Аверьянов В.К., Цыганков А.В. Особенности обеспечения параметров микроклимата плавательных бассейнов // Промышленное и гражданское строительство, 2024. №3. С. 11–16.
4. Денисихина Д.М., Луканина М.А., Самолетов М.В. Математическое моделирование микроклимата в помещении бассейна // АВОК, 2012. №3. С. 56–60.
5. Dmitriev A.A., Ivanova Yu.V., Tayrit V.R. Analysis of indoor air quality in the swimming pool in Ulan-Ude. Proc. of Engineering, Construction and Infrastructure Solutions for Innovative Medicine Facilities (ECSF-2021). May 19–21, 2021. Pp. 99–109.
6. Palmowska A., Lipska B. The experimental validation of numerical modeling of the air distribution in the indoor Ice Rink Arena. Proc. of the World Congress on Mechanical, Chemical and Material Engineering (MCM-2015). July 20–21, 2015. Barcelona, Spain.
7. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. — М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
8. Averb'yanov V., Ulyasheva V., Vasiliev V. Selection of turbulence models in case of numerical simulation of heat, air and mass exchange processes. Proc. of 10th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering (EKO-DOK 2018). April 16–18, 2018. Polanica-Zdroj, Poland. E3S Web of Conf. Vol. 44. 2018.
9. SolidWorks | 3D CAD Design Software & PDM Systems [Электр. текст]. Dassault Systèmes — SolidWorks Corp. Режим доступа: solidworks.com. Дата обращ.: 12.06.2024.

References — see page 80.

Numerical simulation of spa ventilation. Pp. 50–52.

Tamara A. Datsyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Alexander M. Grimitlin**, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Voldemar R. Taurit**, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Julia V. Ivanova**, PhD, Associate Professor, senior lecturer, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)

1. Ju.S. Krasnov. *Sistemy ventilatsii i konditsionirovaniya. Rekomendatsii po proektirovaniyu dlja proizvodstvennykh i obshchestvennykh zdaniy* [Ventilation and air conditioning systems. Design recommendations for industrial and public buildings]. Moscow. *Termokul* ["Thermocool" Publishing House]. 2006. 288 p. [In Russian]
2. M.G. Tarabanov. *Konditsionirovanie vozdukh. Chast' 1* [Air conditioning. Part 1]. Moscow. AVOK-Press [Publishing House of the Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics ("ABOK-Press")]. 2015. 212 p. [In Russian]
3. V.M. Uljasheva, Ju.V. Ivanova, V.K. Aver'janov, A.V. Tsygankov. *Osobennosti obespechenija parametrov mikroklimata plavatel'nykh bassejnov* [Features of providing microclimate parameters of swimming pools]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* ["Industrial and Civil Engineering" Magazine]. 2024. No. 3. Pp. 11–16. [In Russian]
4. D.M. Denisikhina, M.A. Lukanina, M.V. Samoletov. *Matematicheskoe modelirovanie mikroklimata v pomeshenii bassejna* [Mathematical modeling of indoor microclimate in a swimming pool]. AVOK [Journal of the Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics (ABOK)]. 2012. No. 3. Pp. 56–60. [In Russian]
5. A.A. Dmitriev, Yu.V. Ivanova, V.R. Tayrit. Analysis of indoor air quality in the swimming pool in Ulan-Ude. Proc. of ECSF-2021 (Engineering, Construction and Infrastructure Solutions for Innovative Medicine Facilities). May 19–21, 2021. Pp. 99–109.
6. A. Palmowska, B. Lipska. The experimental validation of numerical modeling of the air distribution in the indoor Ice Rink Arena. Proc. of the World Congress on Mechanical, Chemical and Material Engineering (MCM-2015). July 20–21, 2015. Barcelona, Spain.
7. S. Patankar. *Chislennyye metody reshenija zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti* [Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics]. Moscow. *Jenergoatomizdat* [Publishing House of Energy and Nuclear Industry of the USSR ("Energoatomizdat" Publishers)]. 1984. 152 p.
8. V. Aver'janov, V. Ulyasheva, V. Vasiliev. Selection of turbulence models in case of numerical simulation of heat, air- and mass exchange processes. Proc. of 10th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering (EKO-DOK 2018). April 16–18, 2018. Polanica-Zdroj, Poland. E3S Web of Conferences. Vol. 44. 2018.
9. SolidWorks | 3D CAD Design Software & PDM Systems. Dassault Systèmes — SolidWorks Corp. Web-source: solidworks.com. Access date: June 12, 2024.