

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF322770>

Математическое моделирование процессов теплообмена воздушных масс в помещениях с ледовой ареной

И.А. Бурков, М.А. Колосов, А.А. Жаров, Л.М. Колышкин, Н.А. Андреев

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (научно исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование: Системы вентиляции и кондиционирования ледовых арен должны обеспечивать комфортное пребывание людей в помещении и на льду, а также защиту поверхности льда от конденсации влаги. Использование метода конечных элементов при проектировании систем вентиляции позволяет на этапе расчета определить температурно-влажностный режим во всем объеме вентилируемого помещения и, при необходимости, исправить параметры вентиляции с минимальными затратами на этапе проектирования.

Цель – описание методики численного моделирования теплообмена в помещении с учетом влажного воздуха и лучистого теплообмена на примере небольшой тренировочной арены.

Методы: для моделирования было использовано программное обеспечение ANSYS CFX, использующее при расчетах метод конечных объемов. Объектом исследования являлся цифровой двойник малой тренировочной ледовой арены, позволяющий учитывать теплофизические процессы, происходящие в помещении. Исследование проводилось для установившегося (стационарного) режима теплообмена. Оценка результатов моделирования проводилась по контурам температур и влажности воздуха в наиболее характерных секущих плоскостях. Ввиду отсутствия возможности прямого определения влажности воздуха средствами программного комплекса, было приведено описание способа определения влажности по эмпирическому уравнению.

Результаты: численным путем установлено, что в исследуемой ледовой арене, при заданных параметрах работы системы вентиляции, целевые показатели воздуха выполняются. Конденсация влаги над ледовой поверхностью не происходит, а в зонах пребывания людей обеспечиваются комфортные условия.

Заключение: моделирование теплообменных процессов в помещении ледовой арены позволяет как избежать повреждения льда от конденсации влаги, так и проверить комфортность пребывания людей на льду и на трибунах.

Ключевые слова: ледовая арена; температурные поля; влажный воздух; HVAC; ANSYS CFX.

Как цитировать:

Бурков И.А., Колосов М.А., Жаров А.А., Колышкин Л.М., Андреев Н.А. Математическое моделирование процессов теплообмена воздушных масс в помещениях с ледовой ареной // Холодильная техника. 2021. Т. 110, № 2. С. 77–84. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF322770>

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF322770>

Mathematical modeling of heat and mass transfer processes of air masses in premises with an ice arena

Ivan A. Burkov, Michail A. Kolosov, Anton A. Zharov, Leonid M. Kolishkin, Nikolay A. Andreev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The ventilation and air conditioning systems for ice arenas should not only provide a comfortable environment for the people indoors and on the ice but also protect the ice surface from moisture condensation. The use of finite element methods in designing the ventilation systems will make it possible to determine the temperature and humidity conditions in the entire volume of the ventilated room at the calculation stage and, if necessary, to correct the ventilation parameters at minimal costs at the design stage.

AIM: To describe the methods of numerical simulation of heat and mass transfer in a room taking into account the humidity and radiant heat exchange for the case of a small training arena.

MATERIALS AND METHODS: ANSYS CFX software was used for modeling, using the finite volume method for calculations. The object of the study was a digital twin of a small training ice arena, making it possible to take into account the thermal-physical processes occurring in the room. Analysis was performed for the steady-state (stationary) heat and mass transfer condition. The modeling results were evaluated by considering air temperature and humidity contours in the most characteristic secant planes. Given that the direct determination of air humidity was not possible using the software package, a description of a method for the determination of humidity by empirical equations was provided.

RESULTS: It was numerically established that the air targets are met in the ice arena under the given parameters of operation of the ventilation system, with no moisture condensation on the surface of the ice, and comfortable conditions maintained in the areas where people are present.

CONCLUSION: The modeling of the heat and mass exchange processes in the ice arena room makes it possible to avoid ice damage from moisture condensation as well as ensure the comfort of people present on the ice and in the bleachers.

Keywords: ice arena; temperature fields; humid air; HVAC; ANSYS CFX.

To cite this article:

Burkov IA, Kolosov MA, Zharov AA, Kolishkin LM, Andreev NA. Mathematical modeling of heat and mass transfer processes of air masses in premises with an ice arena. *Refrigeration Technology*. 2021;110(2):77–84. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF322770>

ВВЕДЕНИЕ

В мире и России сегодня проектируется и возводится множество спортивных залов с ледовыми аренами различных типов и размеров [1–3]. Системы кондиционирования и вентиляции (Heating Venting Air Conditioning, HVAC) подобных залов имеют много особенностей конструкции и индивидуальных условий эксплуатации, среди них: наличие искусственного ледового поля; жёсткие требования по параметрам льда и воздуха в зоне пребывания спортсменов и зрителей; сложность регулирования влажности в подобных помещениях, что часто приводит к образованию конденсата на внутренних поверхностях и т.п. Всё это ставит множество вопросов перед проектировщиками подобных объектов, ответы на которые можно получить с помощью моделирования. Особое внимание необходимо уделять защите ледовой арены от конденсации влаги, скапливающейся под потолком и над полем. Повышение влажности воздуха под потолком обусловлено несколькими факторами: лучистым теплообменом между потолком и льдом, внешним охлаждением потолка, некорректной работой вентиляционной системы. Практика показывает, что подобные проблемы, наносящие вред качеству ледовой поверхности, достаточно часто возникают на новых ледовых аренах, и это требует дорогой модернизации проекта. Кроме того, необходимо выполнить строгое зонирование пространства ледовых арен: трибуны для зрителей должны находиться в теплой зоне, где температура воздуха поддерживается в диапазоне $+19...+22^{\circ}\text{C}$, а спортсмены должны находиться в зоне прохладного воздуха с температурой около $+10^{\circ}\text{C}$ (значение данной температуры зависит от вида спорта, которым занимаются спортсмены). Очевидно, что в любом случае недопустимо даже кратковременное образование тумана под потолком и у поверхности льда. Оптимальными величинами относительной влажности около поверхности льда являются 70...80%.

Пакеты вычислительной гидродинамики (CFD) в сочетании с мощными вычислительными машинами сегодня позволяют с высокой точностью проанализировать и изучать особенности работы систем вентиляции в просторных залах [4–14]. Использование пакетов CFD позволит избежать ошибок в конструкции ледовых арен на стадии проектирования, позволит сократить стоимость эксплуатации арены и повысит комфорт людей. Вместе с тем, особенности залов с ледовыми аренами накладывают ограничения на возможности моделирования, и поэтому сегодня нет устоявшихся подходов к расчёту и проектированию подобных систем. В связи с этим, проведение отработки и верификации таких программ целесообразно проводить на основе реализованных проектов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На примере небольшой проектируемой ледовой тренировочной арены (до 150 зрителей и 100 спортсменов во время групповой тренировки) необходимо провести расчет тепломассовых процессов в помещении, определить температурные и скоростные поля течения воздуха, а также его влажность. В рассматриваемой арене имеют место следующие процессы: воздушный тепломассообмен в помещении от приточно-вытяжной вентиляции с заданным объемным расходом воздуха, тепловыделение от ламп освещения, людей и конвекторов, охлаждение воздуха ледовой ареной, лучистый теплообмен между потолком и ледовой поверхностью, влаговыделение от людей и регулярной заливки ледовой поверхности. Предполагается, что ледовая арена является не отдельно стоящим зданием, а расположена внутри торгового центра, поэтому не учитывается теплоприток от стен и потолка внутрь помещения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическое моделирование осуществлялось в ANSYS 18.1 CFX. Данное приложение позволяет рассчитывать движение жидкостей и газов в пространствах сложной формы с учетом турбулентности и гравитации [15–20]. Расчет проводился в стационарном режиме, процессы, возникающие при первичной наморозке льда, не рассматривались.

Расчетная геометрическая модель показана на рис. 1. Она состоит из одного объемного тела – теплической среды, который состоит из двух веществ – сухого воздуха и водяного пара. На рис. 1 показаны места размещения основных элементов технологических систем, участвующих в формировании параметров воздуха в зале.

Сетка конечных элементов состояла из 19.8 млн элементов в форме тетраэдра с размерами от 5 мм до 500 мм. Для более точного моделирования процесса теплоотдачи радиаторов, ламп, зрителей и хоккеистов, в областях воздуха, граничащих с данными источниками теплоты, были использованы призматические пограничные элементы. Общий вид сетки конечных элементов в области зрительских трибун показан на рис. 2.

Граничные условия, описывающие происходящие в зале ледовой арены процессы, приведены в таблице 1. Данные граничные условия характерны для режима работы в теплое время года, этим объясняется отсутствие теплопритоков от нагревателей в представленном расчете, т.к. в данном режиме работы они не используются. Летний режим работы был

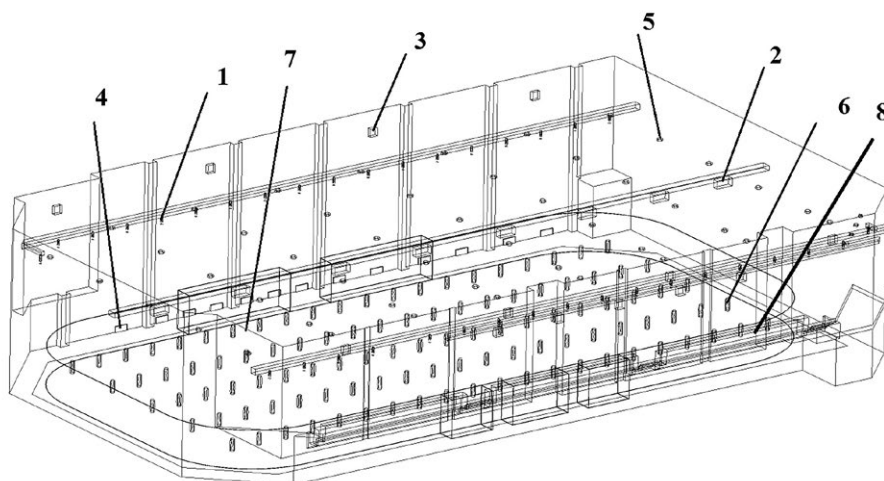


Рис. 1. Общий вид геометрической модели зала ледовой арены. 1 – сопла приточной вентиляции; 2 – вытяжные отверстия, 3 – воздухонагреватели; 4 – батареи центрального отопления; 5 – осветительные приборы; 6 – игроки; 7 – поверхность льда; 8 – зрители.

Fig. 1. General layout of the ice arena geometric model. 1 – nozzles of supply ventilation; 2 – exhaust openings, 3 – air heaters; 4 – central heating batteries; 5 – lighting; 6 – players; 7 – ice surface; 8 – spectators.

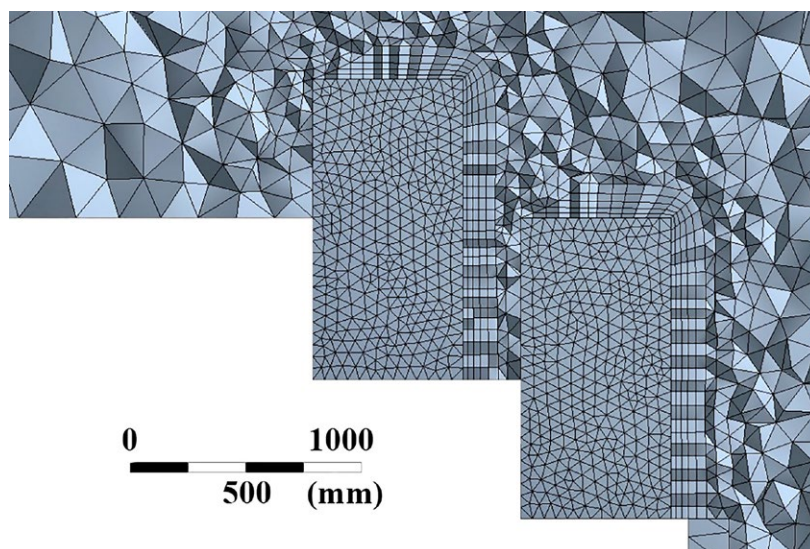


Рис. 2. Сетка конечных элементов в зоне зрительских трибун. Показаны измельчение элементов в форме тетраэдра в зоне граничных условий и пограничные слои призматической формы, непосредственно примыкающие к граничному условию.

Fig. 2. Finite elements grid in the area of the viewing stands. Shredding of elements in the form of a tetrahedron in the zone of boundary conditions and the boundary layers of a prismatic shape directly adjacent to the boundary condition are shown.

Таблица 1. Граничные условия, использованные в расчете. Для зрителей и спортсменов граничные условия приведены для одного человека, общее количество зрителей – 150 человек, спортсменов – 100 человек

Table 1. Boundary conditions used in the calculation. For spectators and athletes, the boundary conditions are given for one person, the total number of spectators is 150 people, athletes – 100 people

Граничное условие	Температура / Тепловыделение	Влаговыведение	Расход воздуха
Ледовая арена	–6°C	25 кг/ч	
Освещение	60 Вт/м ²		
Зрители	132 Вт/чел.	40 г/ч/чел.	
Хоккеисты	191 Вт/чел.	135 г/ч/чел.	
Вентиляция	20°C		16 000 м ³ /час
Лучистый теплоприток от потолка ко льду	60 Вт/м ²		

выбран для расчета как более нагруженный с точки зрения влаговыделения в помещении. Количество зрителей и хоккеистов выбрано максимально допустимым по проекту арены при их одновременном нахождении в помещении.

В расчете была использована модель турбулентности k -epsilon, тип остатка – RMS, величина остатка решателя – 10^{-5} . Моделирование осуществлялось с распараллеливанием расчета на 8 ядер.

При расчете решатель ANSYS Solver итерационным методом решает уравнения неразрывности, сохранения энергии, турбулентности, теплопроводности. Относительная влажность воздуха определяется отношением давления водяного пара к равновесному давлению насыщенных паров при данной температуре. При этом, равновесное давление определяется по эмпирическому уравнению Тетенса в зависимости от температуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Был проведен стационарный расчет с граничными условиями, приведенными в таблице 1. В результате моделирования были получены распределения температур, относительной влажности и скорости воздуха во всем объеме зала ледовой арены. На рисунке 3 показаны данные параметры в среднем вертикальном сечении арены.

Как видно из рис. 3а, температура воздуха в области пребывания зрителей находится в комфортных для людей пределах – не ниже $+19^{\circ}\text{C}$. От зрительских трибун к потолку наблюдается восходящий поток теплого воздуха. Наибольшим источником влаги в помещении является ледовая поверхность (рис. 3б). При нормальной эксплуатации ледовая поверхность каждый час заливается теплой водой (около $+60^{\circ}\text{C}$), часть из которой испаряется и формирует приток влаги в помещении.

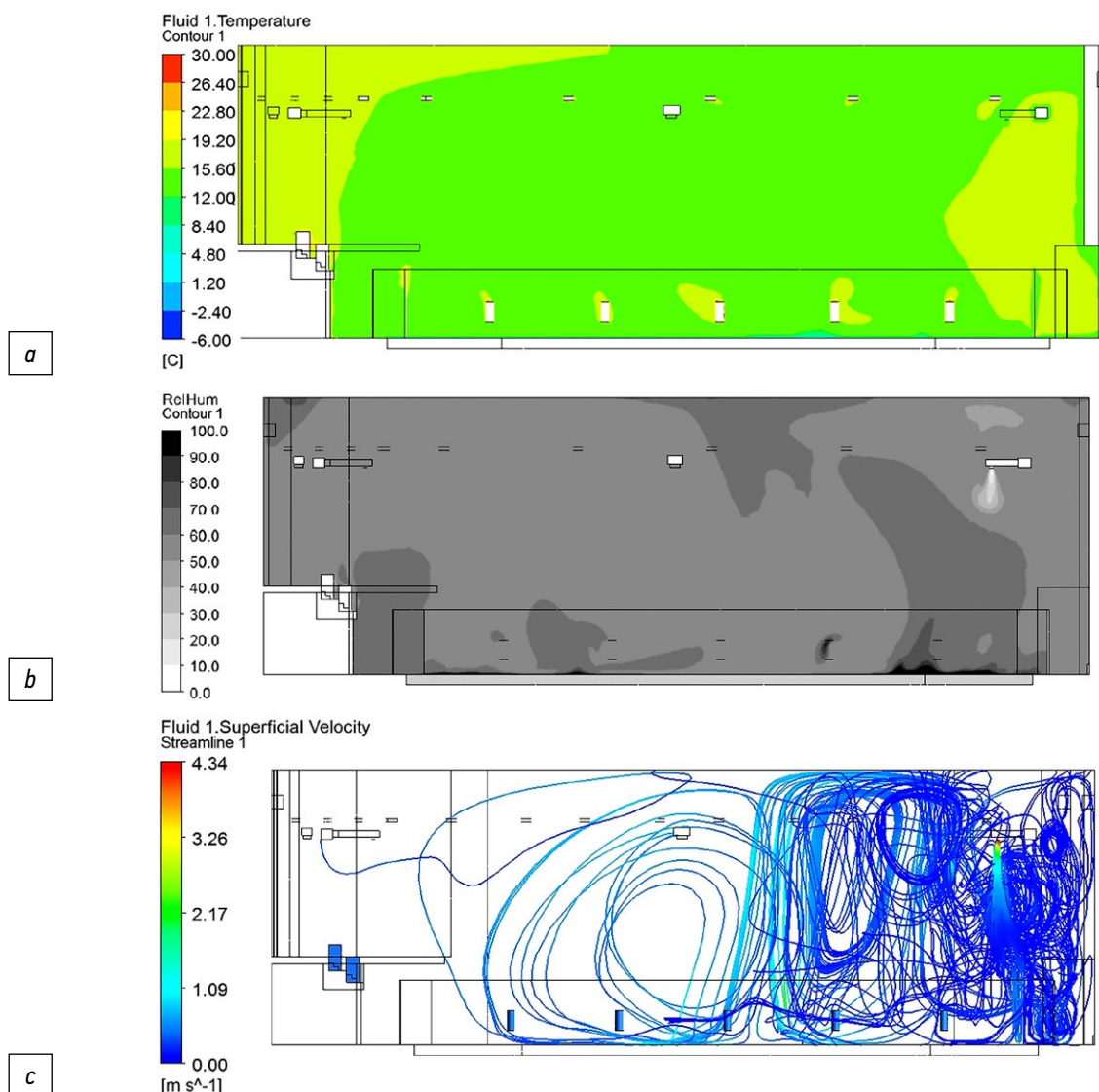


Рис. 3. Результаты моделирования ледовой арены в среднем сечении арены. *a* – поле температур; *b* – поле относительной влажности; *c* – линии тока из приточного сопла, расположенного с противоположной стороны от зрителей.

Fig. 3. The results of modeling in the middle section of the ice arena. *a* – the temperature field; *b* – the field of relative humidity; *c* – flow lines from the supply nozzle located on the opposite side of the spectators.

Влаговыделение от зрителей малозаметно, т.к. происходит непосредственно под приточной вентиляцией, подающей относительно сухой воздух. Также из поля относительной влажности видно, что под потолком ледовой арены отсутствует зона повышенной (более 80%) влажности.

Рис. 3с показывает траекторию течения приточного воздуха. Как видно из данного рисунка, в области пребывания хоккеистов имеется постоянное движение воздуха с незначительной (до 0.2 м/с) скоростью, обеспечивающий комфортное пребывание людей в данной зоне.

ВЫВОДЫ

В результате моделирования параметров зала с ледовой ареной были получены поля температур, скоростей и относительной влажности воздуха во всем объеме. Расчетным путем было установлено, что выбранные характеристики работы системы вентиляции обеспечивают требуемые эксплуатационные параметры воздуха. Подтверждено, что при данных условиях достигается обеспечение комфортных параметров воздуха в зонах пребывания людей. Предлагаемая методика моделирования позволяет численно определить основные особенности процессов тепломассообмена в помещениях с нехарактерными значениями температур и влажности.

Учет лучистого теплообмена необходим для более точного моделирования распределения параметров в помещении. В данной работе моделирование лучистого теплообмена от потолка ко льду было осуществлено путем задания теплового потока, полученного

экспериментальным путем. При этом, для различных ледовых арен он может отличаться в зависимости от размеров арены, условий эксплуатации и внешних факторов. Для более точного учета лучистого теплообмена возможно использовать метод Монте-Карло. Данный метод позволит рассчитывать лучистый теплообмен между всеми поверхностями зала ледовой арены и повысит точность моделирования параметров воздуха.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с подготовкой и публикацией статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contributions. All authors made a substantial contribution to the conceptual development and preparation of this article and read and approved the final version before publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bellache O., Ouzzane M., Galanis N. Numerical prediction of ventilation patterns and thermal processes in ice rinks // *Building and Environment*. 2005. Vol. 40, N 3. P. 417–426. doi: 10.1016/j.buildenv.2004.08.004
2. Zhao R., Zhou L., Ma J. CFD design of ventilation system for large underground bus terminal in Macau Barrier Gate // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2018. Vol. 179. P. 1–13. doi: 10.1016/j.jweia.2018.05.010
3. Palmowska A., Lipska B. The experimental validation of numerical modeling of the air distribution in the indoor ice rink arena // *Proceedings of the World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering*. Paper № 276, P. 276–1 – 276–6, [дата обращения: 09.02.2021] Доступ по ссылке: https://avestia.com/MCM2015_Proceedings/files/papers/HTFF276.pdf
4. H-e H., Wang J., Li S., et al. Temperature Field Simulation of Powder Sintering Process with ANSYS // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018. Vol. 324, N 1. doi: 10.1088/1757-899X/324/1/012008
5. Joudi A., Cehlin M., Svedung H., et al. Numerical and experimental investigation of the influence of infrared reflective interior surfaces on building temperature distributions // *Indoor and Built Environment*. 2017. Vol. 26, N 3. P. 355–367. doi: 10.1177/1420326X15609966
6. Kobayashi T., Sugita K., Umemiya N., et al. Numerical investigation and accuracy verification of indoor environment for an impinging jet ventilated room using computational fluid dynamics // *Building and Environment*. 2017. Vol. 115. P. 251–268. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.01.022
7. Molina-Aiz F.D., Fatnassi H., Boulard T., et al. Comparison of finite element and finite volume methods for simulation of natural ventilation in greenhouses // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2010. Vol. 72, N 2. P. 69–86. doi: 10.1016/j.compag.2010.03.002
8. Moon J.H., Lee J.W., Jeong C.H., et al. Thermal comfort analysis in a passenger compartment considering the solar radiation effect // *International Journal of Thermal Sciences*. 2016. Vol. 107. P. 77–88. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.013
9. Nardecchia F., Gugliermetti F., Bisegna F. How temperature affects the airflow around a single-block isolated building // *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 118. P. 142–151. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.03.003
10. Nazarian N., Kleissl J. Realistic solar heating in urban areas: Air exchange and street-canyon ventilation // *Building and Environment*. 2016. Vol. 95. P. 75–93. doi: 10.1016/j.buildenv.2015.08.021

11. Palmowska A., Lipska B. Research on improving thermal and humidity conditions in a ventilated ice rink arena using a validated CFD model // *International Journal of Refrigeration*. 2018. Vol. 86. P. 373–387. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.11.016
12. Risberg D., Risberg M., Westerlund L. CFD modelling of radiators in buildings with user-defined wall functions // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 94. P. 266–273. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.134
13. Rojano F., Bournet P.-E., Hassouna M., et al. Computational modelling of thermal and humidity gradients for a naturally ventilated poultry house // *Biosystems Engineering*. 2016. Vol. 151. P. 273–285. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.09.012
14. Santolini E., Pulvirenti B., Benni S., et al. Numerical study of wind-driven natural ventilation in a greenhouse with screens // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. Vol. 149. P. 41–53. doi: 10.1016/j.compag.2017.09.027
15. Русаков С.В. К расчету тепловых и влажностных нагрузок ледовых катков. Нагрузка от радиационного переноса теплоты // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2014. № 1. [дата обращения: 09.03.2021] Доступ по ссылке: <http://refrigeration.ihbt.ifmo.ru/file/article/8611.pdf>
16. Kulik V.V., Parkin A.N., Navasardyan E.S. Numerical Modeling Procedure for Micromachined Cryogenic Cooler Elements Using ANSYS Fluent. Software and Viscous Flow in a Small-Diameter Channel with Heat Transfer as an Example // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016. Vol. 52, N 7–8. P. 531–538. doi: 10.1007/s10556-016-0227-0
17. Aleksandrov A.A., Arkharov I.A., Navasardyan E.S., et al. Modeling of Processes in Microcryogenic Gas Cooler // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016. Vol. 51, N 9–10. P. 649–655. doi: 10.1007/s10556-016-0101-0
18. Al-Zoubi A., Beilke J., Korchagova V.N., et al. Comparison of the performance of open-source and commercial CFD packages for simulating supersonic compressible jet flows // *Proceedings – 2018 Ivannikov Memorial Workshop, IVMEM 2018*. Yerevan: IEEE, 2018. doi: 10.1109/IVMEM.2018.00019
19. Burkov I.A., Zherdev A.A., Pushkarev A.V., et al. Simulation of fluid hypothermia for robot-assisted prostatectomy // *Journal of Enhanced Heat Transfer*. 2018. Vol. 25, N 2. P. 121–136. doi: 10.1615/JEnhHeatTransf.2018026370
20. Sørensen D.N., Voigt L.K. Modelling flow and heat transfer around a seated human body by computational fluid dynamics // *Building and Environment*. 2003. Vol. 38, N 6. P. 753–762. doi: 10.1016/S0360-1323(03)00027-1

REFERENCES

1. Bellache O., Ouzzane M., Galanis N. Numerical prediction of ventilation patterns and thermal processes in ice rinks. *Building and Environment*. 2005;40(3):417–426. doi: 10.1016/j.buildenv.2004.08.004
2. Zhao R, Zhou L, Ma J. CFD design of ventilation system for large underground bus terminal in Macau Barrier Gate. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2018;179:1–13. doi: 10.1016/j.jweia.2018.05.010
3. Palmowska A, Lipska B. The experimental validation of numerical modeling of the air distribution in the indoor ice rink arena. In: *Proceedings of the World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering*. Barcelona; 2015. Accessed: 09.02.2021. Available from: https://avestia.com/MCM2015_Proceedings/files/papers/HTFF276.pdf
4. He H, Wang J, Li S, et al. Temperature Field Simulation of Powder Sintering Process with ANSYS. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*. 2018;324(1). doi: 10.1088/1757-899X/324/1/012008
5. Joudi A, Cehlin M, Svedung H, et al. Numerical and experimental investigation of the influence of infrared reflective interior surfaces on building temperature distributions. *Indoor and Built Environment*. 2017;26(3):355–367. doi: 10.1177/1420326X15609966
6. Kobayashi T, Sugita K, Umeyama N, et al. Numerical investigation and accuracy verification of indoor environment for an impinging jet ventilated room using computational fluid dynamics. *Building and Environment*. 2017;115:251–268. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.01.022
7. Molina-Aiz FD, Fatnassi H, Boulard T, et al. Comparison of finite element and finite volume methods for simulation of natural ventilation in greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2010;72(2):69–86. doi: 10.1016/j.compag.2010.03.002
8. Moon JH, Lee JW, Jeong CH, et al. Thermal comfort analysis in a passenger compartment considering the solar radiation effect. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016;107:77–88. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.013
9. Nardecchia F, Gugliemmetti F, Bisegna F. How temperature affects the airflow around a single-block isolated building. *Energy and Buildings*. (2016) 118, pp. 142–151. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.03.003
10. Nazarian N, Kleissl J. Realistic solar heating in urban areas: Air exchange and street-canyon ventilation. *Building and Environment*. 2016;95:75–93. doi: 10.1016/j.buildenv.2015.08.021
11. Palmowska A, Lipska B. Research on improving thermal and humidity conditions in a ventilated ice rink arena using a validated CFD model. *International Journal of Refrigeration*. 2018;86:373–387. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.11.016
12. Risberg D, Risberg M, Westerlund L. CFD modelling of radiators in buildings with user-defined wall functions. *Applied Thermal Engineering*. 2016;94:266–273. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.134
13. Rojano F, Bournet P-E, Hassouna M, et al. Computational modelling of thermal and humidity gradients for a naturally ventilated poultry house. *Biosystems Engineering*. 2016;151:273–285. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.09.012
14. Santolini E, Pulvirenti B, Benni S, et al. Numerical study of wind-driven natural ventilation in a greenhouse with screens. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018;149:41–53. doi: 10.1016/j.compag.2017.09.027
15. Rusakov SV. K raschetu teplovyh i vlazhnostnyh nagruzok ledovyh katrov. Nagruzka ot radiacionnogo perenosu teploty. *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya «Holodil'naya tekhnika i kondicionirovanie»*. 2014;1. Accessed: 09.03.2021. Available from: <http://refrigeration.ihbt.ifmo.ru/file/article/8611.pdf>
16. Kulik VV, Parkin AN, Navasardyan ES. Numerical Modeling Procedure for Micromachined Cryogenic Cooler Elements Using ANSYS Fluent. Software and Viscous Flow in a Small-Diameter Channel with Heat Transfer as an Example. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016;52(7–8):531–538. doi: 10.1007/s10556-016-0227-0

17. Aleksandrov AA, Arkharov IA, Navasardyan ES, et al. Modeling of Processes in Microcryogenic Gas Cooler. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016;51(9–10):649–655. doi: 10.1007/s10556-016-0101-0

18. Al-Zoubi A, Beilke J, Korchagova VN, Strizhak SV, Kraposhin MV. Comparison of the performance of open-source and commercial CFD packages for simulating supersonic compressible jet flows. In: *Proceedings - 2018 Ivannikov Memorial Workshop, IVMEM 2018*. Yerevan: IEEE; 2018. doi: 10.1109/IVMEM.2018.00019

19. Burkov IA, Zherdev AA, Pushkarev AV, et al. Simulation of fluid hypothermia for robot-assisted prostatectomy. *Journal of Enhanced Heat Transfer*. 2018;25(2):121–136. doi: 10.1615/JEnhHeatTransf.2018026370

20. Sørensen, DN, Voigt LK. Modelling flow and heat transfer around a seated human body by computational fluid dynamics. *Building and Environment*. 2003;38(6):753–762. doi: 10.1016/S0360-1323(03)00027-1

ОБ АВТОРАХ

* Бурков Иван Александрович;

адрес: Российская Федерация, 105005, Москва,
Лефортовская наб., д. 1;
eLibrary SPIN: 1855-3314;
e-mail: burkovia@bmstu.ru

Колосов Михаил Анатольевич,

канд. техн. наук;
ORCID: 0000-0003-2451-8333;
eLibrary SPIN: 8196-6580;
e-mail: kolosov@bmstu.ru

Жаров Антон Андреевич,

канд. техн. наук;
ORCID: 0000-0001-9945-0850;
eLibrary SPIN: 8581-1809;
e-mail: zharov_a@bmstu.ru

Колышкин Леонид Михайлович;

e-mail: kolishkin@bmstu.ru

Андреев Николай Алексеевич;

eLibrary SPIN: 5918-9446;
e-mail: andreev_aa@student.bmstu.ru

* Автор, ответственный за переписку

AUTHORS' INFO

* Ivan A. Burkov;

address: 1 Lefortovskaja naberezhnaja, 105005 Moscow,
Russian Federation;
eLibrary SPIN: 1855-3314;
e-mail: burkovia@bmstu.ru

Michail A. Kolosov,

Cand. Sci. (Tech.);
ORCID: 0000-0003-2451-8333;
eLibrary SPIN: 8196-6580;
e-mail: kolosov@bmstu.ru

Anton A. Zharov,

Cand. Sci. (Tech.);
ORCID: 0000-0001-9945-0850;
eLibrary SPIN: 8581-1809;
e-mail: zharov_a@bmstu.ru

Leonid M. Kolishkin;

e-mail: kolishkin@bmstu.ru

Nikolay A. Andreev;

eLibrary SPIN: 5918-9446;
e-mail: andreev_aa@student.bmstu.ru

* Corresponding author