

Изменение параметров микроклимата в течение хоккейного матча в зале крытой ледовой арены

Д. М. Денисихина, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», заместитель генерального директора ООО «ММ-Технологии», denisikhina@mail.ru

С. В. Русаков, технический директор ООО «РУСЬЭНЕРГОМОНТАЖ», rsvit@mail.ru

Ключевые слова: ледовая арена, воздухораспределение, воздухообмен, CFD-расчет, CFD-моделирование, нестационарные нагрузки

Современные спортивные сооружения с искусственным льдом – одни из наиболее технически сложных и энергоемких инженерных сооружений. Назначение систем холодоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха (В и КВ) таких объектов – поддержание требуемых температуры ледовой плиты и параметров воздушной среды (температуры, влажности воздуха, концентрации CO_2) в объеме чаши ледовой арены. При этом одной из основных сложностей при проектировании систем В и КВ ледовых арен является необходимость поддержания отличающихся значений параметров воздуха в зоне ледового поля (определяемых требованиями к состоянию ледовой поверхности [1]) и параметров в зоне нахождения зрителей [2].

С точки зрения расчета воздухораспределения и воздухообмена при проектировании систем В и КВ ледовых арен сложность заключается в том, что определить схему циркуляции воздуха, а также выделить четкие зоны с преобладанием вынужденной или свободной конвекции оказывается затруднительным. Это связано с тем, что циркуляция воздуха в объеме

ледовой арены, с одной стороны, определяется приточными струями от воздухораспределителей, а с другой – мощными конвективными потоками теплого воздуха от заполненных зрительских трибун. Отделить зоны влияния данных потоков, спрогнозировать их поведение и взаимодействие затруднительно. Кроме того, в задачах с искусственным

льдом возникает необходимость учета радиационной составляющей на значительной части поверхностей, участвующих в теплообмене (поверхности льда, кровли, стен). В этом случае проектировщик сталкивается с дефицитом информации и инженерных методик, позволяющих принять оптимальные технические решения [3].

Другой особенностью поддержания микроклимата в объеме ледовых арен является динамичное изменение параметров воздушной среды в течение одного спортивного мероприятия. При этом в процессе проведения хоккейного матча распределения температуры, влагосодержания, концентрации CO_2 часто не успевают достичь своего расчетного стационарного значения. В этом случае системы В и КВ, определенные проектным решением исходя из балансовых соображений, оказываются переразмеренными по тепло- и холодопроизводительности и расходу воздуха. Следовательно, учет при создании проектного решения изменения во времени параметров микроклимата позволит сэкономить капитальные и эксплуатационные затраты.

Постановка задачи

В статье рассмотрены следующие подходы для расчета параметров микроклимата:

- 1) классический стационарный балансовый метод;
- 2) тепло-, газо-, влажностные нагрузки постоянны во времени. Изменение параметров микроклимата в процессе мероприятия происходит на основании гипотезы мгновенного перемешивания [4];
- 3) тепло-, газо-, влажностные нагрузки переменны во времени (постепенное заполнение мест зрителями, уход зрителей на перерыв и их возвращение, появление дополнительных влажностных нагрузок при заливке льда комбайном во время перерывов). Любое изменение параметров микроклимата в процессе мероприятия также мгновенно распространяется на весь объем;
- 4) тепло-, газо-, влажностные нагрузки переменны во времени, расчет изменения параметров микроклимата в объеме ледовой арены проводится на основе дифференциальных уравнений турбулентного переноса (CFD-моделирование). В этом случае учитывается динамика процессов переноса тепла, влаги и CO_2 в объеме в зависимости от расположения источников и организации воздухообмена.

Очевидно, что от первого подхода к четвертому увеличивается точность прогнозирования параметров микроклимата, но одновременно с этим увеличивается и трудоемкость вычислений. В связи с этим



Двух- и трехходовые водогрейные газовые котлы ГК-НОРД от 75 кВт до 5 МВт

Надежность • Экономичность
Простота в обслуживании • Доступные цены



Компактные мини-котельные ТГУ-НОРД от 30 до 350 кВт

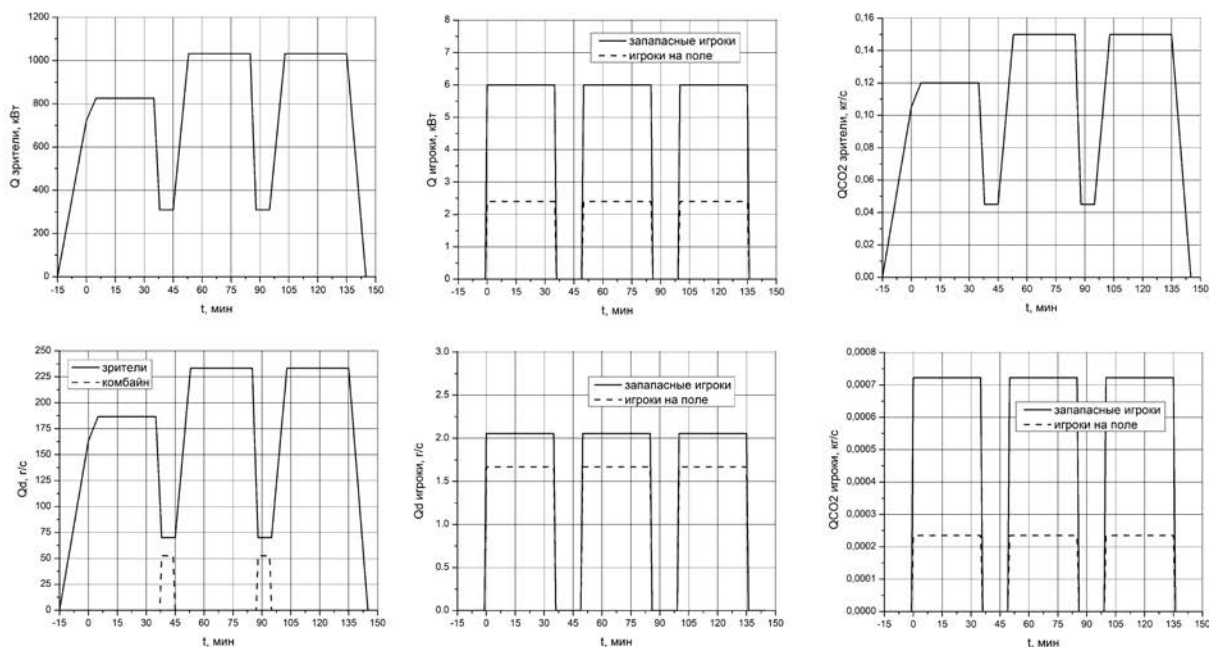
Автономный источник тепла и ГВС
Позволяет отказаться от тепловых сетей
На базе котлов ГК-НОРД



Сделано в России

Производитель ООО «Северная Компания»
Эксклюзивный дистрибьютор ООО «Авитон»

www.aviton.info
post@aviton.info
+7 (812) 677 93 42



■ Рис. 1. Профили тепло-, газо-, влажностных нагрузок в течение хоккейного матча

важно понять, насколько отличаются результаты расчетов при использовании данных подходов.

В настоящем исследовании подходы 1–4 были применены для задачи моделирования микроклимата в объеме крытой ледовой арены вместимостью 12 тыс. зрителей в режиме проведения хоккейного матча.

В рамках подхода 4 для расчета распределения параметров микроклимата по объему ледовой арены использовались методы вычислительной гидродинамики [5], базирующиеся на численном решении дифференциальных трехмерных уравнений Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу.

Последние годы методы CFD-моделирования все больше используются в задачах вентиляции и кондиционирования воздуха, в частности, для моделирования воздушораспределения в объеме ледовых арен [6–10].

Инструментом исследования в настоящей работе является гидродинамический вычислительный комплекс STAR-CCM+. Уравнения и особенности постановки задач численного моделирования микроклимата ледовых арен приведены в работах [11–13].

Проектное решение

Для поддержания тепловлажностных параметров воздуха в объеме крытой ледовой арены рассмотрен

вариант с подачей воздуха из щелевых решеток в строительных конструкциях под сиденьями зрителей, расположенных по периметру зала (подача воздуха в подтрибунное пространство). Удаление воздуха осуществляется через решетки, расположенные по периметру зала над зрительными рядами на высоте 27,5 м. Таким образом, в зале организована «вытесняющая» схема вентиляции [14]. подача воздуха в сторону ледовой площадки не предусматривалась.

Параметры приточного воздуха, подаваемого в объем «чаши» арены: расход воздуха: $442\,700\text{ м}^3/\text{ч}$; температура: $14,9\text{ °C}$; влажосодержание: $4,7\text{ г/кг}$; концентрация CO_2 в приточном воздухе: 400 ppm .

Для подходов 3 и 4 (тепло-, газо-, влажностные нагрузки переменны во времени) были приняты профили изменения нагрузок, приведенные на рис. 1. Данные профили учитывают наличие в хоккейном матче трех периодов и двух перерывов. В графиках также учтено, что заполнение и покидание помещения арены зрителями происходит не мгновенно, а в течение какого-то времени. Так, заполнение зрительских мест начинается за 15 минут до начала матча. При этом первый период смотрят около 80% зрителей, со второго периода – зал полный. Во время перерывов 70% зрителей покидает зал.

В игре участвуют две команды по 25 человек, из которых 12 хоккеистов одновременно находятся на

льду. В перерывах спортсмены в зале отсутствуют, выполняется заливка льда двумя льдоуборочными комбайнами, сопровождающаяся выделением водяных паров в объем ледовой арены.

Постоянные тепловыделения: теплопритоки от медиакуба: 50 000 Вт; теплопритоки от освещения: 158 560 Вт.

Удельные выделения тепла, влаги, углекислоты от спортсменов и зрителей приняты по справочным данным.

В моделях также принято: температура поверхности льда составляет $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом сразу после заливки начинается конденсация водяных паров из воздуха на льду с последующим замерзанием.

Для подходов 1 и 2 в качестве стационарных нагрузок приняты значения максимальных нагрузок на графиках **рис. 1**.

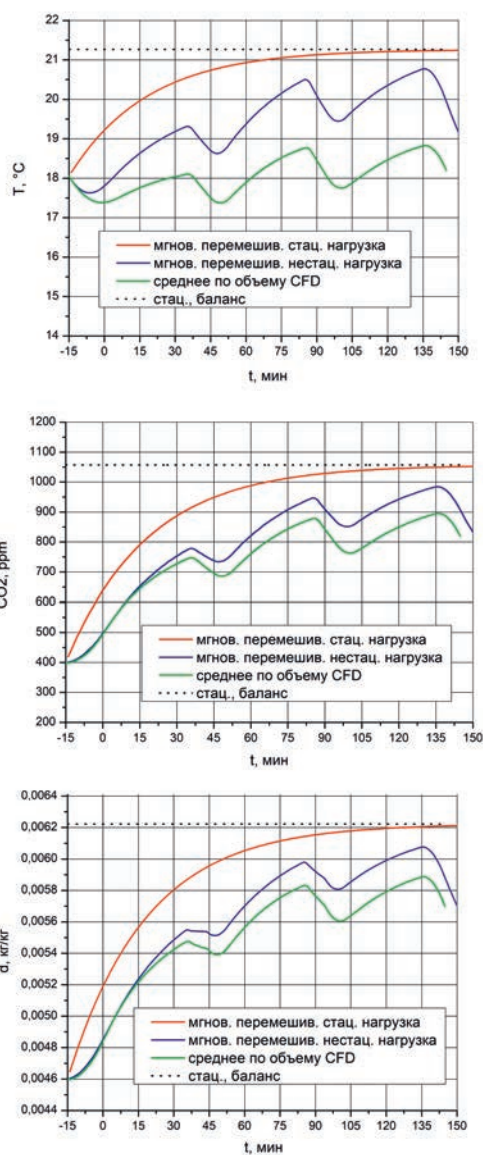
Для проведения CFD-расчета (подход 4) была построена конечно-объемная расчетная сетка размерностью 4 млн ячеек. Особое внимание было уделено разрешению сеточной структуры в области формирования, развития и распространения приточных струй вблизи источников тепловыделений (зрителей, освещения, медиакуба), а также качеству расчетной сетки у поверхности льда.

Результаты расчетов

Результаты расчетов представлены в виде изменения температуры, влагосодержания, концентрации CO_2 в течение хоккейного матча для четырех рассмотренных подходов (**рис. 2**).

Как видно из представленных результатов, в случае постоянных тепло-, газо-, влажностных нагрузок и гипотезы мгновенного перемешивания (подход 2) происходит постепенное увеличение средних по объему температуры, влагосодержания и концентрации CO_2 с приближением к результатам стационарного расчета. Скорость изменения параметров микроклимата при этом тем выше, чем меньше объем зала: в нашем случае параметры стабилизировались около стационарных значений (с отклонением менее 5%) через 1,5 часа после начала матча. Таким образом, подход 2 иллюстрирует влияние объема на динамику изменения микроклимата в зале.

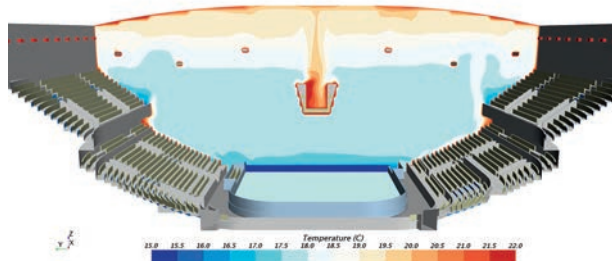
При учете изменения нагрузок в течение матча и гипотезы мгновенного перемешивания (подход 3) за время проведения матча среднеобъемные параметры микроклимата не успевают достичь своих стационарных значений (**рис. 2**). 3-й подход иллюстрирует влияние на изменение параметров



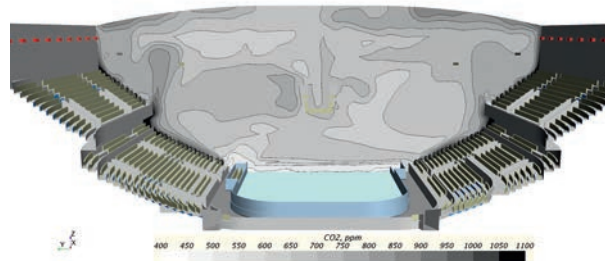
■ **Рис. 2.** Изменение среднеобъемных температуры, концентрации CO_2 , влагосодержания в течение хоккейного матча при использовании различных подходов

микроклимата в зале нестационарности нагрузок с учетом объема этого зала.

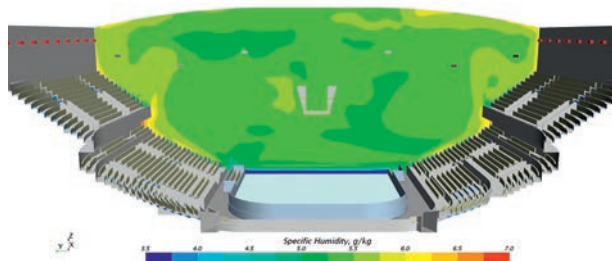
Моделирование с учетом турбулентного тепло-массообмена с помощью CFD-подходов (подход 4) показало, что характер изменения средних по объему величин температуры, влагосодержания, концентрации CO_2 в течение времени близок к аналогичным зависимостям, полученным с использованием подхода 3, однако сами значения параметров заметно меньше (**рис. 2**). Подход 4 позволяет учесть не только нестационарность нагрузок и вклад объема в формирование микроклимата в зале, но и влияние



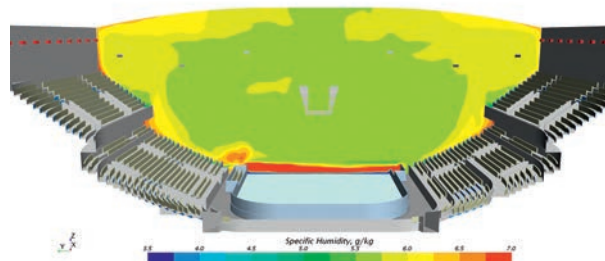
■ Рис. 3. Поле температуры через 30 мин после начала матча



■ Рис. 4. Поле концентрации CO₂ через 30 мин после начала матча



■ Рис. 5. Поле влагосодержания через 30 мин после начала матча



■ Рис. 6. Поле влагосодержания через 2 ч после начала матча

принятой схемы распределения воздуха. В случае нашего примера применение подхода 4 позволит заметно уменьшить проектный воздухообмен для проведения хоккейных матчей по сравнению с применением классических балансовых методов.

На рис. 3–5 представлены поля распределения температуры, влагосодержания и концентрации CO₂ по объему ледовой арены в момент времени 30 мин от начала матча. На рисунках видно, что в объеме ледовой арены формируется существенно неравномерное распределение параметров микроклимата. Именно поэтому результаты, полученные с помощью CFD-подхода, отличаются от упрощенных подходов 1–3.

Приведенные результаты получены для конкретной схемы воздухораспределения и могут отличаться от других вариантов воздухораспределения (подачей воздуха сверху, комбинированной подачи). В настоящем исследовании показан потенциал использования методов нестационарного CFD-моделирования для исследования изменения параметров микроклимата в течение времени. Конкретные возможности для уменьшения воздухообмена должны исследоваться отдельно для каждого конкретного случая. Кроме того, уменьшение расхода приточного воздуха для проведения отдельных мероприятий может повлиять на расчетную схему воздухораспределения.

В частности, приточные струи могут не достигать рабочей зоны.

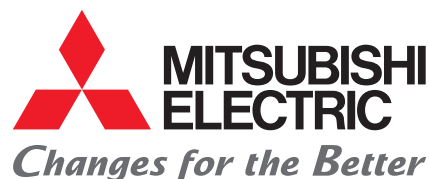
Так, при рассмотрении результатов расчета полей влагосодержания, начиная с 50-й мин, в зоне ледовой площадки наблюдается увеличение влагосодержания воздуха сверх расчетных значений (рис. 6). Для предотвращения этого необходимо модернизировать схему воздухораспределения, добавив подачу осушенного воздуха в сторону ледовой площадки. При этом корректно учесть все многообразие факторов, влияющих на формирование микроклимата во всех зонах зала ледовой арены, возможно только с применением такого универсального инструмента, как CFD-моделирование.

Выводы

Показано, что подход нестационарного CFD-моделирования для помещения ледовой арены может быть использован для снижения проектных расходов приточного воздуха, в том числе наружного, уменьшения мощности холодильных машин. Нестационарный CFD-подход весьма трудоемкий, но с учетом интенсивного развития вычислительной техники может стать в ближайшее время востребован. □

Литература

1. ASHRAE Handbook. Refrigeration. Chapter 44. Ice Rinks. 2014. ASHRAE.
2. Панкратов В. В., Шилкин Н. В. Особенности климатизации ледовых арен // АВОК. – 2009. – № 8. – С. 24–36.
3. Русаков С. В. К расчету тепловых и влажностных нагрузок ледовых катков. Нагрузка от радиационного переноса теплоты // Научн. журн. НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». – 2014. – № 1. URL: <http://refrigeration.ihbt.ifmo.ru>.
4. Эльтерман В. М. Вентиляция химических производств. 3-е изд. М., Химия, 1980.
5. Nielsen P. V., Allard F., Awbi H. B. et al. Computational fluid dynamics in ventilation design. 2007. REHVA Guide Book 10. RHEVA.
6. Bellache O., Ouzzane M., Galanis N. Numerical prediction of ventilation patterns and thermal processes in ice rinks // Build. Environment. – 2005. – Vol. 40. – P. 417–426.
7. Yang C., Demokritou P., Chen Q., Spengler J. Experimental Validation of a Computational Fluid Dynamics Model for IAQ applications in Ice Rink Arenas // Indoor Air. – 2001. – Vol. 11 (2). – P. 120–126.
8. Stobiecka A., Lipska B., Koper P. Comparison of air distribution systems in ice rink arena ventilation // Science – Future of Lithuania. – 2013. – Vol. 5 (4). – P. 429–434.
9. Demokritou P., Chen Q., Yang C., Spengler, J. The impact of ventilation on air quality in indoor ice rink arenas // Proc. of Healthy Buildings. – 2000. – Vol. 2. – P. 407–412.
10. Yang C., Demokritou P., Chen Q. et al. Ventilation and air quality in indoor ice skating arenas // ASHRAE Transactions. – 2000. – Vol. 106 (2). – P. 338–346.
11. Анисимов С. М., Денисихина Д. М., Полушкин В. И. Решение задачи турбулентного переноса импульса, тепла, примеси в объеме «чаши» ледовой арены // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 5 (34). – С. 149–155.
12. Денисихина Д. М. Исследование различных схем воздухораспределения ледовых арен // Известия вузов. Строительство. – 2015. – № 5. – С. 38–48.
13. Denisikhina D., Samoletov M., Brodach M. Air distribution in indoor ice skating rinks // REHVA J. – 2017. – Vol. 4. – P. 46–51.
14. Скистад Х., Мундт Э., Нильсен П., Хагстрем К., Райдио Н. Вытесняющая вентиляция в непромышленных зданиях. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006.
15. Системы кондиционирования воздуха Дворца зимнего спорта «Айсберг» // АВОК. – 2015. – № 3.



РАСШИРЯЕТ СВОЮ ПРОДУКТОВУЮ ЛИНЕЙКУ ОБОРУДОВАНИЕМ CLIMAVENETA



JAPAN

Реклама



A Group Company of MITSUBISHI ELECTRIC

Climaveneta — европейский лидер в сфере кондиционирования, отопления и вентиляции с 40-летней историей.

С 2015 года компания входит в состав Mitsubishi Electric Corporation

aircon@mer.mee.com