



## Теоретическое обоснование выбора технических решений систем обеспечения микроклимата крытых катков

С.В. Чуйкин<sup>1✉</sup>, О.А. Куцыгина<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

**Аннотация.** Специфика обеспечения микроклимата крытых катков и ледовых арен заключается в создании температурно-влажностного режима, при котором не допускается образование тумана у поверхности льда, ухудшение его механических свойств и образование конденсата на строительных и вспомогательных конструкциях. Цель исследования – теоретически обосновать выбор схемы воздухообмена в зоне ледового поля, а также предложить конструкцию центрального кондиционера, реализующего предложенный способ воздухообмена, способствующие снижению энергозатрат на обработку воздуха. Предложены методы организации воздухообмена, способствующие достижению требуемых характеристик и параметров, а также обеспечивающие формирование множества вариантов схем обработки воздушных масс и компоновки центральных кондиционеров. Сформулированы принципы организации воздухообмена в зоне ледового поля, такие как подача приточного воздуха сосредоточенными струями, направляемыми под углом или вертикально вниз из верхней зоны пространства крытых катков и ледовых арен и удаление вытяжного воздуха из верхней или обслуживаемой зон. Варианты компоновки секций оборудования центральных кондиционеров и последовательность процессов обработки влажного воздуха на Id-диаграмме показаны по схемам: «сверху–вверх», «сверху–вниз» и «смешанная», характеризующим различия в расходе энергетических ресурсов, стоимостных показателей для оборудования и эксплуатации, что определяет многофакторность и многокритериальность задачи выбора проектного варианта в условиях неопределенности. На основе анализа результатов исследования по критерию дисконтированных затрат теоретически обоснован выбор «смешанной» схемы организации воздухообмена и определена область экономической целесообразности выбранного варианта.

**Ключевые слова:** кондиционирование воздуха, крытые катки, схема воздухообмена, центральный кондиционер, смешение потоков, обоснование проекта

**Для цитирования:** Чуйкин С.В., Куцыгина О.А. Теоретическое обоснование выбора технических решений систем обеспечения микроклимата крытых катков // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2024. Т. 14. № 1. С. 119–132. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-1-119-132>. EDN: QBSQXD.

### Original article

## Theoretical justification for the choice of technical solutions for microclimate support systems of indoor ice rinks

Sergey V. Chuykin<sup>1✉</sup>, Olga A. Kutsygina<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

**Abstract.** The specific character of ensuring the microclimate of indoor ice rinks and ice arenas consists in creating temperature and humidity conditions which prevent fog formation at the ice surface, deterioration of its mechanical properties, and condensation on building structures and auxiliary facilities. The article aims to theoretically justify the choice of an air exchange scheme in the ice arena zone, as well as to propose a design of the central air conditioner that implements the suggested air exchange method. As a result, the energy requirement for air handling can be reduced. The article

proposes methods for air exchange organization contributing to the achievement of the required characteristics and parameters. Employing these methods also results in many options of air mass handling schemes and the layout of central air conditioners. The principles of organizing air exchange in the ice arena zone were formulated. They include supplying incoming air with concentrated airstreams directed at an angle or vertically downward from the upper zone of indoor ice rinks and ice arenas and removing exhaust air from the upper or maintenance areas. The Id-diagram shows layout options of equipment sections for central air conditioners and the sequence of humid air handling processes according to the following schemes: *top-up*, *top-down*, and *mixed*. These schemes characterize differences in energy consumption, as well as cost indicators for equipment and operation, which determines the multifactorial and multicriteria nature of selecting a design option under uncertainty. Based on the analysis of the research results with respect to the discounted cost criterion, the choice of the *mixed* scheme for organizing air exchange is theoretically substantiated. Moreover, the study determines the area of economic feasibility of the selected option.

**Keywords:** air conditioning, indoor skating rinks, air distribution scheme, central air conditioning, flow mixing, project justification

**For citation:** Chuykin S.V., Kutsygina O.A. Theoretical justification for the choice of technical solutions for microclimate support systems of indoor ice rinks. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'* = *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2024;14(1): 119-132. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-1-119-132>. EDN: QBSQXD.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные спортивные комплексы и сооружения включают крытые катки и ледовые арены, которые требуют создания и постоянно поддерживания особого температурно-влажностного режима у поверхности льда для предотвращения образования тумана в зоне ледового поля, ухудшения механических свойств поверхности льда и выпадения конденсата на строительных и вспомогательных конструкциях. Обеспечение заданных параметров микроклимата в помещениях крытых катков и ледовых арен реализуется организацией воздухообмена инженерных систем вентиляции и кондиционирования воздуха с высокой производительностью и, как следствие, значительной стоимостью сооружения и расхода энергетических ресурсов для последующей эксплуатации.

Системы кондиционирования получают все большее распространение в России, однако, сведений о потреблении ими энергии недостаточно. По данным, представленным Центром энергоэффективности (ЦЭНЭФ)<sup>1</sup>, на цели отопления, вентиляции, кондиционирования и освещения жилищ в России приходится 239 кВт·ч/(м<sup>2</sup> в год), и при применении наилучших доступных технологий для климатических условий России эта величина может быть снижена почти в 5 раз – до 50 кВт·ч/м<sup>2</sup> в год.

Указанные особенности определяют актуальность разработки и обоснования вариантов организационных и инженерно-технических

решений систем вентиляции и кондиционирования воздуха крытых катков и ледовых арен, выбора проектных решений, основанных на принципах энергоэффективности и рационального использования ресурсов при достижении требуемого качества эксплуатации.

Цель исследования состоит в теоретическом обосновании выбора схемы воздухообмена для зоны ледового поля, способствующей снижению энергозатрат на обработку воздушных масс и разработке компоновки центрального кондиционера, соответствующей выбранному способу воздухообмена. Поскольку, в соответствии с работами [1–8], температурно-влажностный режим катков и ледовых арен поддерживается системами кондиционирования, объектами исследования в данной статье являются варианты схем воздухораспределения и конструктивных решений соответствующих им центральных кондиционеров.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящее время воздухообмен зоны ледового поля может осуществляться при подаче притока из верхней зоны сосредоточенными струями, направляемыми под углом или вертикально вниз [9–12], и удалении вытяжного воздуха из верхней [9, 10] или обслуживаемой зон [11, 12].

Особые свойства микроклимата в зоне ледового поля позволяют выделить ряд основных технологических процессов обработки воздуха, обеспечивающих поддержание температурно-влажностного режима в требуемом интервале

<sup>1</sup>Башмаков И.А. Сравнение уровней энергоэффективности зданий в России и зарубежных странах // Cenef.ru. Режим доступа: <http://www.cenef.ru/file/ComparisonEEfBuilding.pdf> (дата обращения: 19.01.2024).

параметров. К ним относят процессы осушения, нагрева и смешения воздушных масс, причем ввиду требований по предотвращению образования тумана и конденсата, наибольшее значение для рассматриваемого типа объектов имеет процесс осушения воздуха [1–3, 12–14].

Для его реализации широкое распространение получили установки с роторными адсорбционными осушителями, заполняемыми специальными силикагелями.

Однако следует учесть, что такие устройства требуют значительных объемов капитальных вложений и эксплуатационных затрат, что ограничивает возможность развития сети крытых катков и малых ледовых арен, находящихся за пределами крупных городов и региональных центров. Например, стоимость приточно-вытяжной установки фирмы *Korf*, рассчитанной на обработку 8500 м<sup>3</sup>/ч приточного воздуха и состоящей из секций фильтров, камер нагрева, смешения, теплоутилизатора (осушителя), приточного и вытяжного вентиляторов, воздушных клапанов, составляет порядка 25 млн руб. с учетом стоимости систем автоматики и регулирования (по состоянию на июль 2023 г.).

Снижение затрат на оборудование систем кондиционирования можно обеспечить путем применения устройств, основанных на альтернативных физических принципах. Таковыми являются поверхностные воздухоохладители, для которых в работах [9, 15–17] предлагается ряд схемных решений центральных кондиционеров. Главной проблемой предлагаемых схем является необходимость охлаждения воздуха за счет доведения показателей относительной влажности воздуха до 90–95%, что при определенных условиях приводит к обмерзанию теплообменника, и, в свою очередь, снижает КПД установки. Предотвратить такие последствия можно путем предварительной обработки наружного воздуха перед осушением. А наиболее целесообразным способом для этого является использование особенностей распределения температуры и влажности в различных зонах крытого катка, подробно рассмотренных в [1–5, 17–19]. При этом забор воздуха на рециркуляцию из верхней и нижней зон и поэтапное смешение таких объемов с наружным воздухом происходит посредством применения смешанной схемы воздухообмена, предложенной ранее в работах [3–5].

Реализация рассматриваемой технологии обработки воздуха возможна с помощью предлагаемой компоновки секций для системы кондиционирования воздуха крытых катков, учитывающей дополнительно к базовой установку вытяжного вентилятора, камеру смешения, фильтр, датчики температуры, влажности, перепада давлений, а так же воздушные клапаны

с электроприводами. Именно наличие отдельных секций вытяжных вентиляторов и секций смешения позволяет осуществить ступенчатое смешивание наружного и рециркуляционного воздуха с переменными параметрами и обеспечить возможность регулирования соотношения расходов воздуха на рециркуляцию из различных зон ледового катка.

Схемы компоновки секций оборудования центрального кондиционера (существующие и предлагаемая) с визуализацией основного принципа и последовательности процессов обработки влажного воздуха на Id-диаграмме приведены на рис. 1.

Для первой схемы (рис. 1, I, «сверху–вверх»), получившей наибольшее распространение, вытяжной воздух из верхней зоны после секции вытяжного вентилятора поступает в распределительную камеру, из которой часть воздуха выбрасывается в вытяжную шахту, а часть подается далее на рециркуляцию и перемешивается в камере смешения с приточным воздухом.

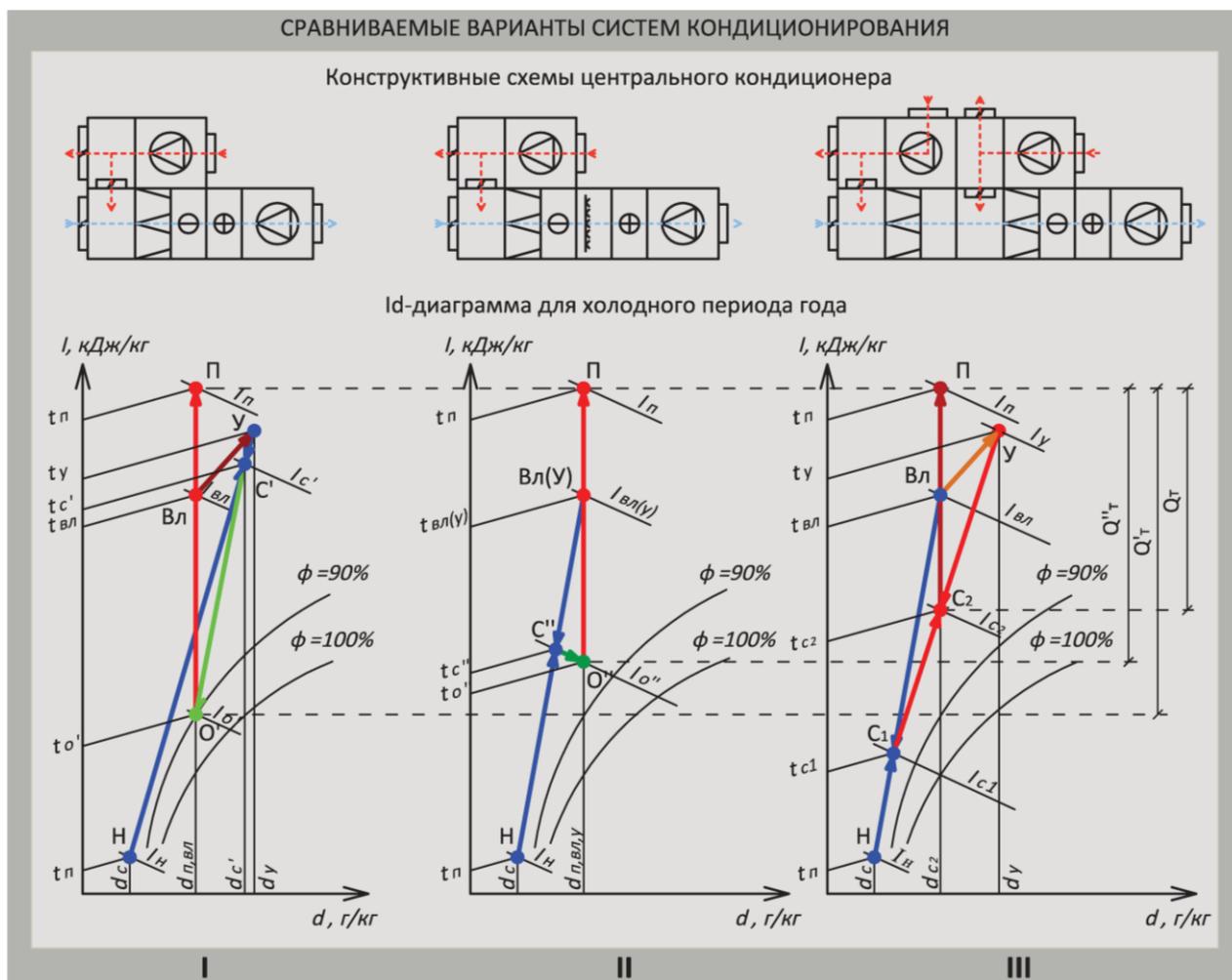
Затем полученная смесь с измененными параметрами фильтруется и, проходя через воздухоохладитель и калорифер, приточным вентилятором подается в воздухораспределительную сеть.

Отличие схемы «сверху–вниз» (рис. 1, II) состоит в том, что вытяжной воздух забирается из обслуживаемой зоны. Вследствие этого в холодный период года может возникнуть необходимость в его дополнительном увлажнении. Для этого центральный кондиционер снабжается дополнительной секцией форсуночного увлажнителя, расположенного перед калорифером.

Предлагаемая смешанная схема обработки воздуха (рис. 1, III) обеспечивается дополнительной установкой вытяжного вентилятора, воздушных клапанов с электроприводами, смесительной камеры, датчиков давления и температуры.

Расположение приточно-вытяжных воздухопроводов и воздухозаборных устройств в верхней и обслуживаемой зонах катка позволяет отбирать воздух с отличающимися параметрами для рециркуляции, который в дальнейшем подается в отдельные смесительные камеры.

Воздух из двух зон подается на обработку за счет двух регулируемых вентиляторов, устанавливаемых в отдельных секциях центрального кондиционера, что предотвращает преждевременное смешивание рециркуляционных потоков. Благодаря регулированию соотношения расходов рециркуляционного воздуха с различными параметрами обеспечивается плавное регулирование параметров подаваемого в зону ледового поля воздуха.



**Рис. 1. Схемы обработки приточного воздуха для зоны ледового поля в центральном кондиционере**  
**Fig. 1. Supply air treatment schemes for the ice field area in the central air conditioner**

В соответствии со смешанной схемой наружный воздух в минимально допустимом по санитарно-эпидемиологическим нормам количестве поступает в смесительную камеру наружного и рециркуляционного воздуха первой ступени, где он перемешивается с рециркуляционным воздухом, поступающим из камеры разделения рециркуляционного и выбрасываемого воздуха, установленной после блока вытяжного вентилятора для удаления воздуха из обслуживаемой (рабочей) зоны. Далее после первой ступени смешения смесь наружного и рециркуляционного воздуха проходит через карманный фильтр и очищается, а после промежуточной камеры поступает в секцию смешения с рециркуляционным воздухом второй ступени, поступающим из камеры разделения рециркуляционного и выбрасываемого воздуха, установленной после блока вытяжного вентилятора, предназначенного для удаления

воздуха из верхней зоны. Образованная смесь наружного воздуха и воздуха после двух ступеней рециркуляции очищается во втором карманном фильтре и поступает в поверхностный воздухоохладитель. После осушения в секции охлаждения воздух проходит через водяной калорифер, нагревается и приточным вентилятором подается в помещение.

Поверхностный воздухоохладитель включается в работу при необходимости осушения обрабатываемого воздуха до требуемых значений влагосодержания приточного воздуха и регулируется системой автоматики, принимающей сигнал от совмещенного датчика температуры и влажности. Расход удаляемого воздуха из верхней и обслуживаемой зон регулируется преобразователями частоты электродвигателей вентиляторов, причем один из вентиляторов может быть отключен. Тогда воздушный баланс помещения крытого катка обеспечивается рабо-

той вентилятора другой ступени.

Соотношение объема рециркуляционного воздуха на первой и второй ступенях смешения регулируется электроприводами воздушных клапанов и определяется итерационным методом, исходя из условий необходимого равенства влагосодержания обработанного в камере охлаждения и приточного воздуха. Изменение соотношения объемов рециркуляционного воздуха с отличающимися параметрами,

поступающего из верхней и обслуживаемой зон, позволяет добиться регулирования термодинамических параметров влажного воздуха при его подготовке в центральном кондиционере без дополнительных энергозатрат на увлажнение, а в ряде случаев – и на охлаждение. Расшифровка последовательности процессов обработки влажного воздуха для рассматриваемых схем приводится в табл. 1.

**Таблица 1.** Технологическая последовательность обработки воздуха в центральном кондиционере при различных схемах воздухообмена  
**Table 1.** Technological sequence of air treatment in a central air conditioner with various air exchange schemes

Обозначение процесса	Описание процесса
<b>I схема «сверху–вверх»</b>	
<i>H-C'-У</i>	Смешение санитарной нормы наружного воздуха с рециркуляционным воздухом, отбираемым из верхней зоны, в секции смешения
<i>C'-О</i>	Осушение воздуха после смешения в секции поверхностного охладителя до требуемого влагосодержания приточного воздуха
<i>О-П</i>	Подогрев воздуха в калорифере после осушения
<i>П-Вл</i>	Охлаждение приточного воздуха при теплообмене с поверхностью льда
<i>Вл-У</i>	Ассимиляция тепло- влагоизбытков удаляемым из верхней зоны воздухом
<b>II схема «сверху–вниз»</b>	
<i>H-C''-Вл(У)</i>	Смешение санитарной нормы наружного воздуха с рециркуляционным воздухом, отбираемым из обслуживаемой зоны, в секции смешения
<i>C''-О</i>	Увлажнение воздуха после смешения в секции форсуночного увлажнения до требуемого влагосодержания приточного воздуха
<i>О-П</i>	Подогрев воздуха в калорифере после камеры увлажнения
<i>П-Вл(У)</i>	Охлаждение приточного воздуха при теплообмене с поверхностью льда
<b>III смешанная схема</b>	
<i>H-C<sub>1</sub>-Вл</i>	Смешение санитарной нормы наружного воздуха с рециркуляционным воздухом, отбираемым из обслуживаемой зоны, в секции смешения первой ступени
<i>C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub>-У</i>	Смешение воздуха после смесительной камеры первой ступени с рециркуляционным воздухом, отбираемым из верхней зоны, в секции смешения второй ступени
<i>C<sub>2</sub>-П</i>	Подогрев воздуха в калорифере после секции смешения второй ступени
<i>П-Вл</i>	Охлаждение приточного воздуха при теплообмене с поверхностью льда
<i>Вл-У</i>	Ассимиляция тепло- влагоизбытков удаляемым из верхней зоны воздухом

Анализ параметров при обработке влажного воздуха по приведенным на рис. 1 схемам в соответствии с ID-диаграммой показывает, что затраты теплоты и холода при смешенной схеме ниже по сравнению с другими вариантами схем. Это подтверждается проведенными расчетами энергозатрат для рассматриваемых схем по среднемесячным климатическим параметрам, свойственным Центральному Черноземью и определяет их уровень по вариантам. Таким образом, проектирование системы кондиционирования воздуха представляет собой многовариантную задачу, требующую решения в результате обоснования расхода ресурсов с учетом множества факторов, которые зачастую действуют разнонаправленно. Многовариантное проектирование становится доступным в

результате использования технологии BIM, поскольку представляет собой инструмент его реализации и информационную базу для расхода ресурсов на этапах строительства и эксплуатации инженерных систем и сооружений. Ресурсы могут быть представлены в стоимостном и натуральном выражении. Так, снижение расхода теплоты или электроэнергии в МВт может стать перерасходом в стоимостном выражении, если возрастет стоимость единицы в рублях. Кроме того, поскольку системы кондиционирования представляют собой оборудование, предназначенное для обеспечения заданных условий микроклимата, а не выпуска продукции для продажи, целесообразно при достижении требуемых параметров обеспечивать наименьшую стоимость и расход ресурсов.

Поэтому критерием выбора проектных решений схем и компоновки системы кондиционирования воздуха [4, 7] целесообразно принять сумму дисконтированных затрат за период их учета по формуле

$$Z_D = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J Z_{ij} \cdot \alpha_t + \sum_{t=-T}^T \sum_{h=1}^H K_{th} \cdot \alpha_t, \quad (1)$$

где  $Z_D$  – дисконтированные затраты на этапах строительства и эксплуатации системы кондиционирования воздуха, тыс. р., для вариантов схем обработки воздуха катков и ледовых арен;  $Z_{ij}$  – годовые эксплуатационные затраты вида  $i$  для реализации проекта системы кондиционирования воздуха для катков и ледовых арен, включая затраты на тепловую и электрическую энергию, воду, холод, текущее обслуживание и ремонты, приведенные к началу эксплуатационного периода  $t=0$ , тыс.р.;  $j$  – элементы эксплуатационных затрат (материалы, оплаты труда и др.), тыс. р.;  $t$  – эксплуатационный период, годы, период учета  $T=10$  лет;  $\alpha_t$  – коэффициент дисконтирования или приведения разновременных затрат и результатов

к базисному периоду, принимаемому равным  $t_0=0$  и определяемому по формуле

$$\alpha_t = \frac{1}{(1+e)^t}, \quad (2)$$

где  $e$  – норма дисконта, принимаемая равной норме дохода на капитал, принимается  $e = 0,1$ ;  $K_{th}$  – объем капитальных вложений (сметная стоимость) системы кондиционирования воздуха по сравниваемым вариантам, тыс. руб.

Следует учесть, что для вариантов с одинаковыми значениями дисконтированных затрат сочетания капитальных вложений и годовых эксплуатационных затрат могут быть различными, а окончательный выбор решения остается за инвестором. В табл. 2 приведена группировка показателей материальных ресурсов в составе сметной стоимости системы кондиционирования воздуха для зоны ледового поля по рассмотренным вариантам, включая центральный кондиционер, приточно-вытяжные воздухопроводы с учетом тепловой изоляции, воздухораспределительные и воздухозаборные устройства.

**Таблица 2.** Группировка материальных ресурсов в составе сметной стоимости системы кондиционирования воздуха для зоны ледового поля

**Table 2.** Grouping of material resources as part of the estimated cost of the air conditioning system for the ice field area

Материальный ресурс	Схема воздухообмена		
	«сверху–вверх»	«сверху–вниз»	«смешанная»
Центральный кондиционер	секции фильтров (1 ед.), шумоглушителя (2 ед.), подогрева (калорифер), камера смешения (1 ед.), охлаждения, приточного и вытяжного вентилятора, насосы системы охлаждения, регуляторы расхода воздуха (1 ед.), камера разделения потоков (1 ед.)		
	–	камера увлажнения	секция фильтров (1 ед.), шумоглушитель (1 ед.), камера смешения (1 ед.), вытяжного вентилятора (1 ед.), регуляторы расхода воздуха (4 ед.), камера разделения потоков (1 ед.), промежуточная камера
Приточно-вытяжные воздухопроводы с теплоизоляцией	приточные воздухопроводы		
	вытяжные воздухопроводы верхней зоны	вытяжные воздухопроводы рабочей зоны	вытяжные воздухопроводы верхней зоны, вытяжные воздухопроводы рабочей зоны
Компрессорные установки	компрессорный блок		
Системы автоматики и регулирования	датчики температуры воздуха и теплоносители, привод воздушной заслонки, термостаты, блоки управления, смесительные узлы, преобразователи частот вентиляторов, датчики перепада давления и др.		

При равенстве капитальных вложений по вариантам кроме капитальных вложений,

в составе дисконтированных затрат следует учитывать годовые эксплуатационные расходы

по формуле

$$I_{ГОД} = I_T + I_{Э} + I_X + I_B + I_A + I_K, \quad (3)$$

где  $I_T$ ,  $I_{Э}$ ,  $I_X$ ,  $I_B$ ,  $I_A$ ,  $I_K$  – соответственно годовые затраты на тепловую энергию, руб., электроэнергию, руб., холод, руб., воду, руб., амортизацию, руб., текущий и капитальный ремонт, руб. [4, 7].

Особенностью систем вентиляции и кондиционирования воздуха является высокая энергоёмкость в результате использования теплоты, электроэнергии и холода для их применения по назначению или эксплуатации. По данным «МФД-ИнфоЦентра» на вентиляцию и системы кондиционирования в мире уже приходится около 10 % от всей производимой электроэнергии. Кроме того, прогнозируемый спрос на системы кондиционирования втрое к 2050 г. повлечет еще более значительный рост энергопотребления, свыше уровня ЕС и США вместе взятых<sup>2</sup>. Таким образом, при анализе эксплуатационных затрат в системах кондиционирования воздуха для зоны ледового поля целесообразно учитывать только годовые показатели стоимости теплоты, воды и электроэнергии, поскольку холод для рассматриваемого объекта вырабатывается на компрессорных установках, а основным энергоресурсом для них является электроэнергия.

Затраты на тепловую энергию определяются по формуле [9]

$$I_T = Q_T \cdot C_T, \quad (4)$$

где  $C_T$  – цена (тариф) теплоты, р./Гкал;  $Q_T$  – годовое количество потребляемой теплоты, Гкал/год.

Затраты на электроэнергию определяются по формуле [9]

$$I_{Э} = Q_{Э} \cdot C_{Э}, \quad (5)$$

где  $C_{Э}$  – цена (тариф) электроэнергии, р./кВт·ч;  $Q_{Э}$  – годовой расход потребляемой электроэнергии, кВт·ч/год, определяется по формуле

$$Q_{Э} = k_H \cdot N \cdot t, \quad (6)$$

где  $k_H$  – коэффициент использования по активной мощности за год;  $t$  – число часов работы электропотребляющих устройств в год, ч;  $N$  – суммарная номинальная мощность электропотребляющих устройств, кВт, определяется по формуле [9]

$$N = N_{x.m}^{ном} + N_H^э + N_6^э, \quad (7)$$

где  $N_{x.m}^{ном}$  – годовое потребление электроэнергии компрессорами, кВт, определяется по формуле

$$N_{x.m}^{ном} = \frac{Q_X}{\eta_{x.m}}, \quad (8)$$

где  $Q_X$  – холодопроизводительность (затраты холода) холодильных установок, кВт;  $\eta_{x.m}$  – холодильный коэффициент;  $N_H^э$  – номинальная мощность электродвигателей насосов, перекачивающих вторичный холодоноситель в системе центрального кондиционирования воздуха зоны ледового поля, кВт, определяющаяся по формуле [17]

$$N_H^э = \frac{G_X \cdot H_W}{3600 \cdot \rho_W \cdot \eta_H \cdot \eta_{эл}}, \quad (9)$$

где  $\eta_H$  – КПД насоса;  $\eta_{эл}$  – КПД электродвигателя;  $H_W$  – потери напора, кПа;  $\rho_W$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $G_X$  – расход охлаждающей воды в воздухоохладителе центрального кондиционера, кг/ч, определяется по формуле [4]

$$G_X = \frac{Q_X \cdot 3600}{\Delta t_W \cdot c_W}, \quad (10)$$

где  $\Delta t_W$  – температурный напор (поверхность-теплоноситель), °С;  $c_W$  – теплоемкость теплоносителя, кДж/(с·кг).  $N_6^э$  – годовое потребление электроэнергии вентиляторами систем кондиционирования воздуха, номинальная мощность которых, кВт, определяется по формуле [4]

$$N_6^э = \frac{L_B \cdot P_B}{3600 \cdot \eta_6 \cdot \eta_{эл}}, \quad (11)$$

где  $L_B$  – производительность вентиляторов, м<sup>3</sup>/ч;  $P_B$  – аэродинамическое сопротивление системы вентиляции и кондиционирования, кПа;  $\eta_6$  – КПД вентилятора.

Затраты на воду могут быть найдены по формуле [9]

$$I_B = W_B \cdot C_B, \quad (12)$$

где  $C_B$  – цена (тариф) воды, р./куб. м;  $W_B$  – годовой расход воды в год, м<sup>3</sup>/год.

В центральных кондиционерах необходимо учитывать расход воды на подпитку, м<sup>3</sup>/год, который допустимо определять по укрупненной зависимости:

$$G_w^{nod} = g_w^{nod} \cdot T_z, \quad (13)$$

где  $g_w^{nod}$  – часовой расход воды на подпитку, м<sup>3</sup>/ч;  $T_z$  – годовой фонд рабочего времени, ч.

<sup>2</sup>Энергопотребление систем кондиционирования к 2050 г превзойдет ЕС и США // МФК ИНВЕСТ. Режим доступа: <https://mfk-invest.ru/energopotreblenie-sistem-kondicionirovaniya-k-2050-g-prevzoydet-es-i-ssha-sechin/> (дата обращения: 19.01.2024).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Различия в составе материальных ресурсов для системы кондиционирования воздуха определяют отклонения в стоимости строительно-монтажных работ для ее сооружения по сравниваемым вариантам.

В табл. 3 приведены показатели составля-

ющих сметной стоимости по вариантам системы кондиционирования воздуха для зоны ледового поля, включая центральный кондиционер, приточно-вытяжные воздуховоды с учетом тепловой изоляции, воздухораспределительные и воздухозаборные устройства.

**Таблица 3.** Показатели сметной стоимости строительно-монтажных работ по вариантам системы кондиционирования воздуха для зоны ледового поля

**Table 3.** Indicators of the estimated cost of construction and installation work on air conditioning system options for the ice field zone

Показатели	Схема воздухообмена		
	«сверху–вверх»	«сверху–вниз»	«смешанная»
Центральный кондиционер (ЦК)			
ВЕРОСА-500-173-03-21-У3_231028693-ВРЖ	1230160/28	–	–
ВЕРОСА-500-173-03-21-У3_231028694-ВРЖ	–	1655253/38	–
ВЕРОСА-500-173-03-21-У3_231028695-1-ВРЖ ВЕРОСА-500-173-03-21-У3_231028695-ВРЖ	–	–	1512535/34,6
Приточно-вытяжные воздуховоды с теплоизоляцией			
Приточная система (воздуховоды, теплоизоляция, фасонные изделия, воздухораспределители) (ПВВ)	319228/7,3	319228/7,3	319228/7,3
Вытяжная система (воздуховоды, теплоизоляция, фасонные изделия, воздухозаборные устройства) (ПВВ2)	303412/6,9	394435/9,1	5461411/2,4
Компрессорные установки (КУ)			
МАКК 320-1402 МК-РП	2077928/47,6	–	–
МАКК 320-801 МК-РП	–	1535936/35,5	1535936/35
Системы автоматики и регулирования (СА)			
КИП и А для установки 231028693-ВРЖ	434080/10	–	–
КИП и А для установки 231028694-ВРЖ	–	420180/9,7	–
КИП и А для установки 231028695-1-ВРЖ; 231028695-ВРЖ	–	–	456720/10
Итого	4364808/100	4325032/100	4370560/100

Анализ итоговой сметной стоимости (см. табл. 3) показал практическое равенство по вариантам системы кондиционирования воздуха, поскольку различие составляет менее 1 %. Но стоимость третьего варианта – максимальная из трех вариантов и составляет 4370 тыс. руб., что лишь на 45 тыс. руб. и 6 тыс. руб. больше, чем по второму и первому вариантам соответственно. Динамика сметной стоимости элементов в составе системы кондиционирования воздуха приведена на рис. 2 и наглядно показывает, что одинаковую стои-

мость для всех вариантов имеют только системы автоматики (разница 5,2 и 8,4 % для второго и третьего вариантов при доле в стоимости лишь 10%), а также приточные воздуховоды. Стоимость центрального кондиционера имеет определяющую долю в структуре и самое низкое значение для первой схемы, а самое высокое значение – для второй схемы (1 230 160 руб. и 1 655 253 руб. соответственно). Стоимость третьего варианта для смешанной схемы составляет промежуточное значение 1 512 535 руб. и составляет 34,6 % в

структуре. Компрессорные установки имеют одинаковые стоимости для вариантов 2 и 3 (1 535 936 руб.), что значительно меньше, чем стоимость для первого варианта (2 077 928 руб.).

Таким образом, анализ показателей единовременных капитальных вложений позволяет сделать вывод об изменении в их структуре и практически постоянном значении по рассматриваемым вариантам, что не дает явного преимущества при их выборе. Превышение стоимости третьего варианта над вторым на 45 тыс. руб. определяется как сумма превышения стоимости вытяжных систем и систем автоматики на 152 + 36 = 188 тыс. руб., уменьшенная на соответствующее снижение стоимости ЦК на 143 тыс. руб. (188–143 = 45 тыс. руб.).

В табл. 4 приведены расчетные значения годовых расходов и эксплуатационных затрат на энергетические ресурсы для вариантов системы кондиционирования ледовой арены крытого катка в зависимости от схемы подачи воздуха.

Анализ годовых расходов и эксплуатационных затрат на энергетические ресурсы по вариантам системы кондиционирования показал, что наибольший расход ресурсов и эксплуатационных затрат требуется для базового первого варианта, а для второго и третьего варианта – значительно снижается и остается практически на одном уровне.

Технико-экономические показатели для сравниваемых вариантов также приведены в табл. 5 и включают дисконтированные затраты по сравниваемым вариантам.

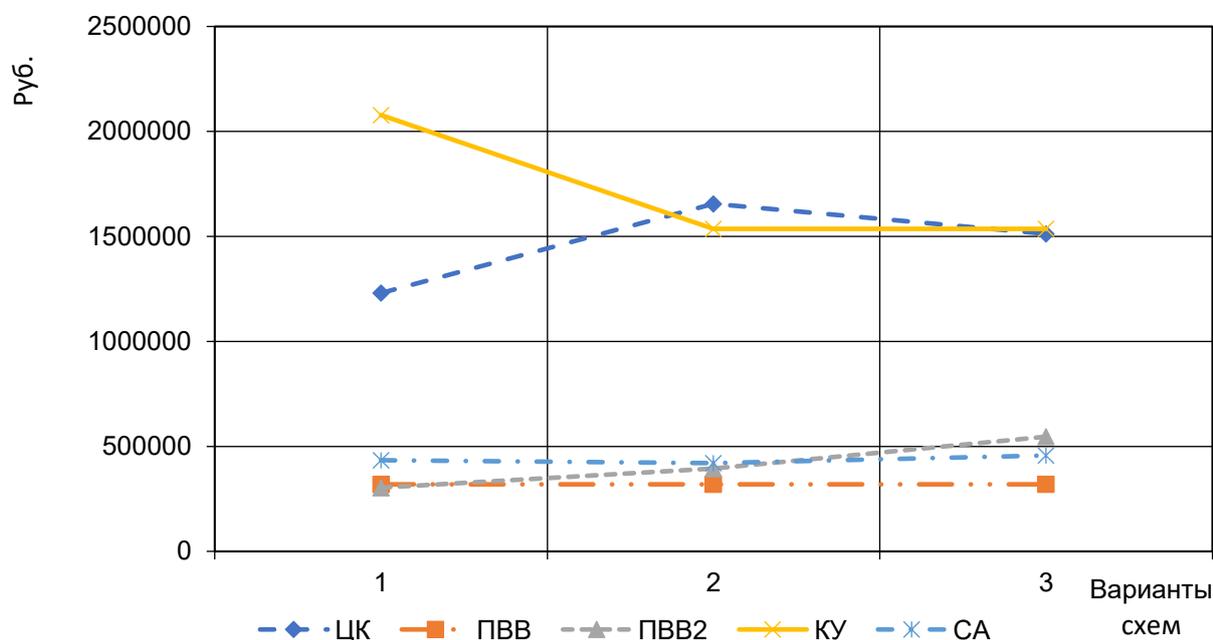


Рис. 2. Показатели динамики сметной стоимости для элементов системы кондиционирования воздуха

Fig. 2. Indicators of the estimated cost dynamics for the elements of the air conditioning system

Следует отметить, что экономически целесообразным вариантом может быть принят третий, поскольку дисконтированные затраты имеют меньшее значение. Экономический эффект от выбора третьего варианта по сравнению с показателями второго и первого вариантов определяется как разница соответствующих значений дисконтированных затрат (420,87 и 3835,857 тыс. руб. соответственно), а также второго варианта по сравнению с первым (3414,987 тыс. руб.). Анализ составляющих дисконтированных затрат показал, что капиталъ-

ные вложения по вариантам можно признать равноэкономичными, несмотря на то, что по третьему варианту их значение самое высокое, поскольку различие составляет около 1 % и не оказывает влияния на принятие решения. Годовые эксплуатационные затраты на топливно-энергетические ресурсы различаются и однозначно определяют выбор третьего варианта, поскольку при величине 1 322 656 руб. имеют значение на 30,2 % меньше, чем для первого варианта и на 5,6 % меньше, чем для второго.

**Таблица 4.** Годовые эксплуатационные затраты на энергетические ресурсы для вариантов системы кондиционирования ледовой арены крытого катка в зависимости от схемы подачи воздуха

**Table 4.** Annual operating costs for energy resources for indoor ice rink air conditioning system options depending on the air supply scheme

Показатели	Схема воздухообмена		
	«сверху–вверх»	«сверху–вниз»	смешанная
Годовой расход энергоресурсов			
Теплоты ( $Q_m$ , МВт)	476,708	383,244	376,072
Холода ( $Q_x$ , МВт)	344,01	133,909	133,909
Воды ( $G_{ув}$ , куб. м)	0	11,32	0
Электроэнергии ( $Q_э$ , МВт·ч)	70,9	80,3	79,6
Годовые эксплуатационные затраты			
Тепловая энергия ( $I_m$ , р.)	782083	628747	616981
Электроэнергия ( $I_э$ , р.)	1165940	769695	705675
Вода ( $I_в$ , р.)	–	281	–
Итого	1948023	1398723	1322656

Примечание: тарифы на ресурсы:  $C_m = 1908,01$  руб/Гкал,  $C_э = 24,86$  руб/м<sup>3</sup>,  $C_в = 4,85$  руб/кВт·ч.

**Таблица 5.** Техничко-экономические показатели для сравниваемых вариантов

**Table 5.** Technical and economic indicators for the compared variants

Показатели	Схема воздухообмена		
	«сверху–вверх»	«сверху–вниз»	смешанная
Годовой расход энергоресурсов			
Капитальные вложения по вариантам, руб.	4364808	4325032	4370560
Годовые эксплуатационные расходы, руб.	1948023	1398723	1322656
Дисконтированные затраты, тыс. руб.	16334,566	12919,579	12498,709
Экономический эффект (снижение дисконтированных затрат 3-го варианта по сравнению с вариантами 1 и 2), тыс. руб.	3835,857	420,87	–
То же, 2-го вариант по сравнению с вариантом 1, тыс. руб.	3414,987	–	–
Энергетический эффект (снижение энергетических затрат 3-го варианта по сравнению с вариантами 1 и 2), тыс. руб.	625367	76067	–
То же, 2-го вариант по сравнению с вариантом 1, тыс. руб.	549300	–	–

Следует отметить, что сделанные выводы будут достоверны только для учетных расчетных значений показателей, поскольку в условиях неопределенности, свойственных рыночной экономике, стоимостные показатели, принимаемые в расчетах в текущий момент времени, могут значительно колебаться как в зависимости от периода времени, так и от возможностей поставщиков в одном и том же

периоде времени.

Поэтому целесообразно определять область исходных данных, для которой сделанные выводы сохраняют достоверность (рис. 3).

Так, например, третий вариант системы центрального кондиционера, реализуемой по «смешанной» схеме, экономически целесообразен при стоимости ЦКЗ = 1512 тыс. руб. и величине ДЗЗ = 12 498 тыс. руб.

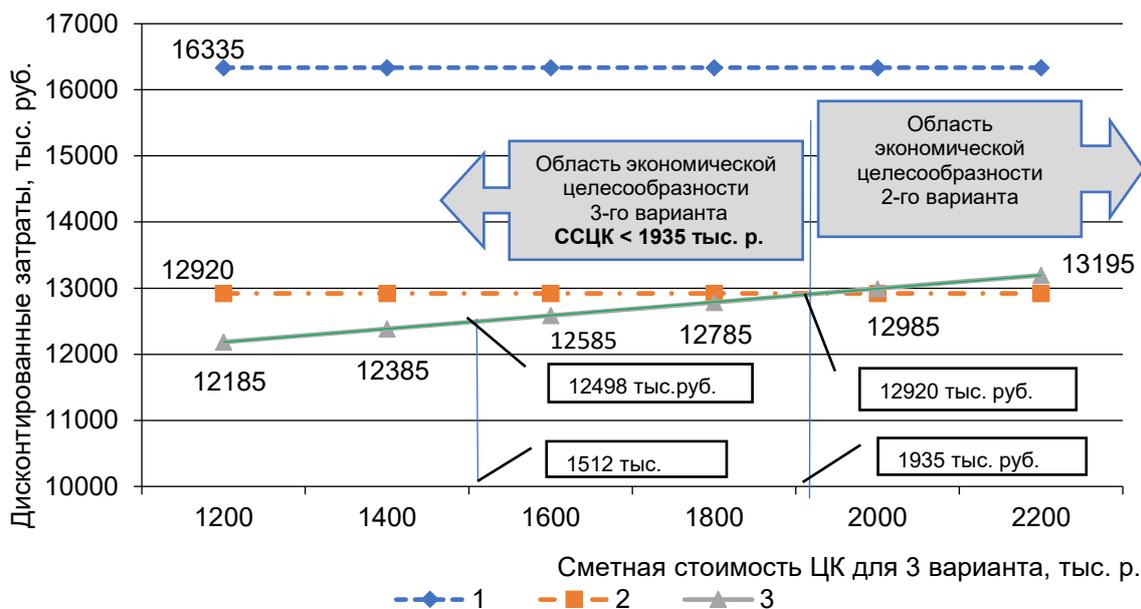


Рис. 3. Область экономической целесообразности применения 3-го варианта  
 Fig. 3. Scope of economic feasibility of application for 3rd option

Если произойдет вероятное изменение сметной стоимости ЦКЗ под влиянием инновационного развития этих систем и факторов рынка в сторону увеличения, и стоимость ЦКЗ достигнет 1935 тыс. руб., то дисконтированные затраты второго и третьего вариантов станут равны и составят 12 920 тыс. руб., что и определит область их экономической целесообразности.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предложенная установка характеризуется тем, что осуществляется двухступенчатое смешение потоков наружного и рециркуляционного воздуха, отбираемого из двух зон, характеризующихся различными температурами, влажностью и энтальпией, при этом соотношение расходов рециркуляции на каждой из ступеней смешения может изменяться за счет регулирования частоты двигателей вытяжных вентиляторов и открытия воздушных клапанов с электроприводами, что позволяет обеспечить требуемое влагосодержание приточного воз-

духа, без его дополнительного увлажнения или осушения, увеличивающего энергозатраты. Обоснование выбора технических решений для систем обеспечения микроклимата открытых катков представляет собой сложную, многофакторную задачу, решение которой зависит от принимаемых конструктивных инженерно-технических и теплотехнических параметров, стоимостных характеристик и других факторов, которые зачастую действуют разнонаправленно и непредсказуемо в условиях неопределенности. Для поиска и выбора проектных решений, наиболее полно удовлетворяющих условиям эксплуатации ледовых катков и спортивных арен, целесообразно реализовать многовариантное проектирование, что возможно с использованием BIM-технологий, выявлять причинно-следственные связи взаимодействующих факторов и определять ограничения, в пределах которых формировать проектные решения для выбора на основе моделирования вариантов затрат.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Денисихина Д.М. Исследование различных схем воздухораспределения ледовых арен // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. № 5 (677). С. 38–48. EDN: UBLRPF.
2. Русаков С.В. К выбору схемы распределения воздуха от систем вентиляции и кондиционирования в зале малого крытого ледового катка // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2017. № 2. С. 26–34. <https://doi.org/10.17586/2310-1148-2017-10-2/3-26-34>. EDN: ZIGILB.
3. Melkumov V.N., Chuykin S.V. Organization of air distribution of covered multipurpose ice rinks // Scientific herald of the Voronezh state university of architecture and civil engineering. Construction and architecture. 2013. Iss. 3 (19). С. 17–28. EDN: QLHSRZ.
4. Melkumov V.N., Chuikin S.V. A scheme and method of calculation for ventilation and air conditioning systems of ice arenas // Journal of Technology. 2017. Vol. 32. Iss. 2. P. 139–146.

5. Чуйкин С.В. Совершенствование методики расчета параметров влажного воздуха при проектировании систем кондиционирования помещений с искусственным льдом // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2023. № 1 (43). С. 65–72.
6. Demokritou Ph., Chen Q., Yang Ch., Spengler J. The impact of ventilation on air quality in indoor ice skating arenas // *Proceedings of healthy buildings*. 2000. Vol. 2. P. 407–412.
7. Ice Rinks // *Ashrae Refrigeration Handbook*. 1994. Ch. 33. P. 33.1–33.9.
8. Yang Ch., Demokritou Ph., Chen Q., Spengler J. Ventilation and air quality in indoor ice skating arenas // *Ashrae Transactions*. 2000. Vol. 106. P. 4405–4414.
9. Кокорин О.Я., Товарас Н.В. Инженерные системы помещений с искусственным льдом и снегом. М.: Курс, 2014. 240 с.
10. Пухкал В.А., Юстус Д.А. Воздухораспределение в помещениях ледовых площадок со зрителями // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2015. № 12 (39). С. 7–31. EDN: VJPKGD.
11. Панкратов В.В., Шилкин Н.В. Особенности климатизации ледовых арен // *АВОК: вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика*. 2009. № 8. С. 24–36.
12. Сошин Р.О., Ткаченко Н.В. Проблемы обеспечения микроклимата ледовых арен // *Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции Факультета архитектуры и дизайна Тихоокеанского государственного университета*. 2016. Т. 3. С. 348–353. EDN: VSDVTH.
13. Русаков С.В. К расчету тепловых и влажностных нагрузок ледовых катков нагрузка от радиационного переноса теплоты // *Научный журнал национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Серия: Холодильная техника и кондиционирование*. 2014. № 1. С. 10. EDN: TOBGVX.
14. Русаков С.В. Оценка влияния влажности воздуха на качество микроклимата в зале ледового катка и на состояние ледовой поверхности // *Научный журнал национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Серия: Холодильная техника и кондиционирование*. 2015. № 2. С. 92–101. EDN: TXNEHN.
15. Кокорин О.Я., Товарас Н.В., Иньков А.П. Энергосберегающие системы кондиционирования воздуха зоны ледового поля помещений искусственных катков // *Холодильная техника*. 2009. № 4. С. 4–7. EDN: KUVANF.
16. Кокорин О.Я., Товарас Н.В., Иньков А.П. Энергосберегающие системы кондиционирования воздуха в спортивных и общественных зданиях, сооружаемых к олимпийским играм «Сочи-2014» // *Холодильная техника*. 2008. № 2. С. 14–22. EDN: JTCUWH.
17. Кокорин О.Я., Товарас Н.В., Иньков А.П. Системы кондиционирования воздуха помещений искусственных катков с применением осушительных аппаратов // *Холодильная техника*. 2006. №11. С. 18–22. EDN: KXBMXZ.
18. Абрамкина Д.В., Петров Г.А. Особенности вентиляции зрительных залов // *Строительство и архитектура*. 2021. Т. 9. № 1. С. 11–15. <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2021-9-1-11-15>. EDN: TCTTTU.
19. Chuykin S.V. Problems of developing methods of designing microclimate systems for premises with artificial // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2022. Vol. 56. Iss. 4. P. 18–28. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.56.4.002>. EDN: QJMDOJ.

## REFERENCES

1. Denisikhina D.M. Research of different air distribution schemes in ice rink arena. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo = News of higher educational institutions. Construction*. 2015;5:38-48. (In Russ.). EDN: UBLRPF.
2. Rusakov S.V. The choice of the scheme of air distribution from ventilation and air-conditioning systems in the hall of the small indoor ice rink. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovanie = Scientific Journal of ITMO Research Institute. Series: Refrigeration and air conditioning*. 2017;2:26-34. (In Russ.). EDN: QLHSRZ.
3. Melkumov V.N., Chuykin S.V. Organization of air distribution of covered multipurpose ice rinks. *Scientific herald of the Voronezh state university of architecture and civil engineering. Construction and architecture*. 2013;3(19):17-28. EDN: QLHSRZ.
4. Melkumov V.N., Chuiyin S.V. A scheme and method of calculation for ventilation and air conditioning systems of ice arenas. *Journal of technology*. 2017;32(2):139-146.
5. Chuykin S.V. Improvement of the methodology for calculating humidity air parameters in the design of air conditioning systems for rooms with artificial ice. *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiya*. 2023;1:65-72. (In Russ.).
6. Demokritou Ph., Chen Q., Yang Ch., Spengler J. The impact of ventilation on air quality in indoor ice skating arenas. *Proceedings of healthy buildings*. 2000;2:407-412.
7. Ice Rinks. *Ashrae Refrigeration Handbook*. 1994. Ch. 33. p. 33.1-33.9.
8. Yang Ch., Demokritou Ph., Chen Q., Spengler J. Ventilation and air quality in indoor ice skating arenas.

*Ashrae Transactions*. 2000;106:4405-4414.

9. Kokorin O.Ya., Tovaras N.V. Engineering systems of rooms with artificial ice and snow. Moscow: Kurs; 2014. 240 p. (In Russ.).

10. Pukhal V.A., Yustus D.A. Air distribution in spectator ice arenas. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdanii i sooruzhenii = Construction of unique buildings and structures*. 2015;12:7-31. (In Russ.). EDN: VJPKGD.

11. Pankratov V.V., SHilkin N.V. Features of the climate control of ice arenas. *AVOK: ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika = ABOK: Engineers for heating, ventilation, airconditioning, heat supply & building thermal physics*. 2009;8:24-36. (In Russ.).

12. Soshin R.O., Tkachenko N.V. Problems of microclimate provision in ice arenas. In: *Novye idei novogo veka: materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii Fakul'teta arkhitektury i dizaina Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta = New ideas of new century: materials of the international scientific conference Faculty of architecture and design of Pacific state university*. 2016. Vol. 3. p. 348-353. (In Russ.). EDN: VSV DTH.

13. Rusakov S.V. To calculation of thermal and moist loadings ice skating rinks loading from radiant heat transfer. *Nauchnyj zhurnal natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki. Seriya: Holodil'naya tekhnika i konditsionirovanie = Scientific Journal of National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Series: Refrigeration and air conditioning*. 2014;1:10. (In Russ.). EDN: TOBGVX.

14. Rusakov S.V. Evaluation of the effect of humidity on the quality of the microclimate in the ice rink and on the condition of the ice surface. *Nauchnyj zhurnal natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki. Seriya: Holodil'naya tekhnika i konditsionirovanie = Scientific Journal of National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Series: Refrigeration and air conditioning*. 2015;2:92-101. (In Russ.). EDN: TXNEHN.

15. Kokorin O.Ya., Tovaras N.V., Inkov A.P. Energy-saving air conditioning systems of the ice field zone of artificial skating-rink premises. *Kholodil'naya tekhnika*. 2009;4:4-7. (In Russ.). EDN: KUVANF.

16. Kokorin O.Ya., Tovaras N.V., Inkov A.P. Energy-saving air conditioning systems in the sports and public buildings, being erected for olympic games "Sochi-2014". *Kholodil'naya tekhnika*. 2008;2:14-22. (In Russ.). EDN: JTCUWH.

17. Kokorin O.Ya., Tovaras N.V., Inkov A.P. Indoor air conditioning systems for artificial ice rinks using dehumidifiers. *Kholodil'naya tekhnika*. 2006;11:18-22. (In Russ.). EDN: KXBMXZ.

18. Abramkina D.V., Petrov G.A. Features of ventilation systems in auditorium. *Stroitel'stvo i arkhitektura = Construction and architecture*. 2021;9(1):11-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2021-9-1-11-15>. EDN: TCTTTU.

19. Chuykin S.V. Problems of developing methods of designing microclimate systems for premises with artificial. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2022;56(4):18-28. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.56.4.002>. EDN: QJMD OJ.

#### Информация об авторах

#### Information about the authors

##### **Чуйкин Сергей Владимирович,**

к.т.н., доцент,  
доцент кафедры строительной механики,  
Воронежский государственный технический  
университет,  
394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84,  
Россия,  
✉ e-mail: s.v.chuykin\_sm@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6040-323X>  
Author ID: 637600

##### **Sergey V. Chuykin,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of Structural  
Mechanics Department,  
Voronezh State Technical University,  
20 letiya Oktyabrya, 84 St., Voronezh 394006,  
Russia,  
✉ e-mail: s.v.chuykin\_sm@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6040-323X>  
Author ID: 637600

##### **Куцыгина Ольга Александровна,**

д.т.н., доцент,  
профессор кафедры теплогазоснабжения  
и нефтегазового дела,  
Воронежский государственный технический  
университет,  
394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84,  
Россия,  
e-mail: olga.kutsigina@rambler.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-2296-3583>  
Author ID: 363047

##### **Olga A. Kutsygina,**

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Professor of Heat and Gas Supply and Oil  
and Gas Business Department,  
Voronezh State Technical  
University,  
20 letiya Oktyabrya, 84 St., Voronezh 394006,  
Russia,  
e-mail: olga.kutsigina@rambler.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-2296-3583>  
Author ID: 363047

#### **Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 19.01.2024.  
Одобрена после рецензирования 26.01.2024.  
Принята к публикации 29.01.2024.

#### **Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

#### **Information about the article**

The article was submitted 19.01.2024.  
Approved after reviewing 26.01.2024.  
Accepted for publication 29.01.2024.