

## Разработка методики и программы расчета параметров воздуха при кондиционировании и вентиляции крытых катков

Сергей Владимирович Чуйкин

*Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); г. Воронеж, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В помещениях с искусственным льдом, к которым относятся крытые катки и ледовые арены, для предотвращения размягчения льда, образования тумана и выпадения конденсата конвективная составляющая теплообмена должна расходоваться на охлаждение воздуха зоны ледового поля до нормируемых значений. От точности расчета микроклиматических параметров зависит не только комфорт находящихся на поле людей, но и качественные характеристики льда. Актуальна разработка методики и программы расчета указанных параметров при проектировании систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

**Материалы и методы.** Для повышения точности расчета предложена новая методика аналитического определения параметров состояния воздуха в зоне ледового поля крытых катков и ледовых арен. Данная методика отличается от существующих применением итерационного метода расчета при выборе оптимального соотношения расходов воздуха на первой и второй ступенях рециркуляции, что позволяет исключить дополнительное охлаждение притока в холодный период года.

**Результаты.** Разработанная методика реализована при составлении алгоритма программы расчета искомых параметров и учитывает современные данные численного моделирования температурных полей в обслуживаемой зоне, скорректированный диапазон величины градиента температуры по высоте рассматриваемого помещения и коэффициента массообмена, определяемого с помощью теории тройной аналогии тепломассообменных процессов.

**Выводы.** Предложенные методика и программа расчета дают возможность повысить точность определения температуры, влагосодержания, парциального давления и энтальпии при проектировании систем вентиляции и кондиционирования помещений с искусственным льдом, что способствует сокращению избыточных энергетических затрат при обработке воздуха в центральном кондиционере.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** вентиляция, кондиционирование, *Id*-диаграмма, процессы обработки воздуха, вентиляция крытых катков, параметры состояния, автоматизированное проектирование

*Благодарности.* Автор выражает благодарность коллегам и рецензентам за профессиональный и ответственный подход к работе.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Чуйкин С.В. Разработка методики и программы расчета параметров воздуха при кондиционировании и вентиляции крытых катков // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 11. С. 1802–1812. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1802-1812

*Автор, ответственный за переписку:* Сергей Владимирович Чуйкин, ser.chu@mail.ru.

## Development of methodology and programme for calculation of air parameters for air conditioning and ventilation of indoor skating rinks

Sergey V. Chuykin

*Voronezh State Technical University (VSTU); Voronezh, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** In premises with artificial ice, which include indoor ice rinks and ice arenas, in order to prevent ice softening, fog formation and condensate precipitation, the convective component of heat exchange should be spent on cooling the air of the ice field area to standardized values. Thus, the accuracy of the calculation of microclimatic parameters depends not only on the comfort of people on the field, but also on the qualitative characteristics of the ice. The presented article is devoted to the development of a methodology and a programme for calculating these parameters when designing ventilation and air conditioning systems.

**Materials and methods.** To improve the calculation accuracy, a new method of analytical determination of air condition parameters in the ice field area of indoor ice rinks and ice arenas is proposed. This method differs from the existing ones by application of iterative calculation method when choosing the optimal ratio of air flow rates at the first and second stages of recirculation, which makes it possible to exclude additional cooling of the inflow during the cold season.

**Results.** The developed method is implemented in the algorithm of the programme for calculation of the required parameters and takes into account the modern data of numerical modelling of temperature fields in the served area, the corrected range

of the temperature gradient value by the height of the room under consideration and the mass transfer coefficient determined using the theory of triple analogy of heat and mass transfer processes.

**Conclusions.** The proposed methodology and calculation programme make it possible to increase the accuracy of determining temperature, moisture content, partial pressure and enthalpy determination when designing ventilation and air conditioning systems for rooms with artificial ice, which contributed to the reduction of excessive energy costs when processing air in the central air conditioner.

**KEYWORDS:** ventilation, air conditioning, *Id* diagram, air treatment processes, indoor ice rink ventilation, condition parameters, computer-aided design

**Acknowledgements.** The author expresses gratitude to the editorial board and reviewers for their professional and responsible approach to the work.

**FOR CITATION:** Chuykin S.V. Development of methodology and programme for calculation of air parameters for air conditioning and ventilation of indoor skating rinks. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1802-1812. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1802-1812 (rus.).

**Corresponding author:** Sergey V. Chuykin, ser.chu@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Помещения с искусственным льдом, к которым относятся крытые катки и ледовые арены, в зависимости от вида проводимых спортивных и культурно-массовых мероприятий могут иметь различные архитектурно-строительные и планировочные решения, влияющие на подход к организации и проектированию систем жизнеобеспечения. Однако определяющим фактором при создании требуемого микроклимата рассматриваемых зданий является наличие обширной охлаждающей поверхности. В последние годы с помощью современных вычислительных средств был проведен ряд теоретических и экспериментальных исследований формирования тепловлажностного и воздушного режимов данных объектов [1–8], что позволило повысить точность получаемых результатов. Тем не менее, ввиду сложности и трудоемкости составления физико-математических моделей в современных программных средах, по-прежнему наибольшим распространением пользуется графоаналитическая методика, изложенная в трудах О.Я. Кокорина [9, 10]. Поскольку испарение и конденсация влаги при взаимодействии ледового поля с окружающим воздухом протекают по границам кристаллов [11, 12], что объясняется меньшей термодинамической устойчивостью границ по сравнению с основной массой кристалла, необходимо стремиться к заливке относительно монолитного слоя льда с крупной кристаллической структурой.

Ключевые проблемы и задачи при формировании более качественного ледового покрытия рассматриваются в работах [11–15], отмечается, что главным условием при теплотехническом расчете холодильного оборудования для заливки льда служит компенсация им тепловых притоков к поверхности льда от окружающей среды, величина которых определяется интенсивностью радиационно-конвективного теплообмена.

Таким образом, большое значение приобретает точность расчета параметров микроклимата, в значительной степени влияющих на тепловой баланс обслуживаемой зоны помещения и его поверхностей. Вышесказанное показывает возросшую акту-

альность разработки новых методов расчета температуры, влажности, энтальпии и других параметров состояния влажного воздуха, что и является основной целью данной статьи.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим более подробно существующую методику определения полного теплового потока к поверхности льда при ее радиационно-конвективном теплообмене с окружающим воздухом. Принято считать, что теплопритоки можно найти с помощью равенства [15–17]:

$$Q_{\text{т.пов}} = Q_{\text{т.кон}} + Q_{\text{т.луч}} + Q_{\text{т.св}}^{\text{е}} + Q_{\text{т.св}}^{\text{и}} + Q_{\text{т.люд}}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{т.кон}}$  — конвективный приток теплоты от воздуха к поверхности льда, Вт;  $Q_{\text{т.луч}}$  — приток лучистой теплоты от ограждающих конструкций и поверхностей к поверхности льда, Вт;  $Q_{\text{т.св}}^{\text{е}}$  — приток лучистой теплоты от естественного освещения, Вт;  $Q_{\text{т.св}}^{\text{и}}$  — теплопритоки к поверхности льда от осветительных приборов, Вт;  $Q_{\text{т.люд}}$  — теплопритоки от людей на льду и в прилегающих зонах, Вт.

Величина конвективных притоков определяются по уравнению Ньютона – Рихмана, которое для рассматриваемого объекта принимает вид [9, 15–17]:

$$Q_{\text{т.кон}} = F_{\text{л}} \cdot \alpha_{\text{кон}} (t_{\text{в}}^{\text{л}} - t_{\text{л}}), \quad (2)$$

где  $F_{\text{л}}$  — площадь ледового поля, м<sup>2</sup>;  $\alpha_{\text{кон}}$  — коэффициент теплоотдачи ледовой поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·град);  $t_{\text{в}}^{\text{л}}$  — температура воздуха в зоне ледового поля, °С;  $t_{\text{л}}$  — температура поверхности льда, °С.

Коэффициент теплоотдачи может определяться по эмпирическим зависимостям:

- методика ASHRAE (США):

$$\alpha_{\text{кон}}^{\text{л}} = 3,41 + 3,55 \cdot v_{\text{л}}, \quad (3)$$

где  $v_{\text{л}}$  — скорость воздуха у поверхности ледового поля, м/с;

- методика из справочника «Различные области применения холода» А.В. Быкова при вынужденном конвективном теплообмене для открытых катков:

$$\alpha_{\text{кон}}^{\text{II}} = 0,037 \cdot \left( \frac{\lambda_{\text{в}}}{\nu_{\text{в}}^{0,8}} \right) w_{\text{в}}^{0,8} \cdot l^{-0,2}, \quad (4)$$

где  $\lambda_{\text{в}}$  — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°C);  $\nu_{\text{в}}$  — кинематический коэффициент вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с;  $w_{\text{в}}$  — среднемесячная скорость ветра в расчетный период, м/с;  $l$  — линейный размер поля в направлении движения ветра, м;

• методика из справочника «Различные области применения холода» А.В. Быкова для крытых катков:

$$\alpha_{\text{кон}}^{\text{III}} = \alpha_{\text{кон}}^{\text{к.к.}} \cdot \xi, \quad (5)$$

где  $\xi$  — коэффициент влаговыпадения, учитывающий выделение тепла при конденсации влаги на теплообменной поверхности.

Приток лучистой теплоты от потолка к поверхности льда принято рассчитывать по формуле:

$$Q_{\text{т.луч}} = F_{\text{л}} \cdot q_{\text{луч}} \cdot \beta_{\text{отр}}, \quad (6)$$

где  $q_{\text{луч}}$  — плотность лучистого теплового потока к поверхности льда от строительных конструкций и ограждающих поверхностей, Вт/м<sup>2</sup>;  $\beta_{\text{отр}}$  — коэффициент отражения (зависит от материала поверхности или конструкции).

Плотность лучистого притока теплоты в общем случае определяется по известной зависимости:

$$q_{\text{луч}} = c_{\text{п}} \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi, \quad (7)$$

где  $c_{\text{п}}$  — приведенный коэффициент излучения, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T_1$  и  $T_2$  — температуры взаимодействующих поверхностей, К;  $\varphi$  — коэффициент облучения, учитывает взаимное расположение поверхностей теплообмена.

Приток лучистой теплоты от естественного освещения рассчитывают по формуле:

$$Q_{\text{т.св}}^{\text{е}} = F_{\text{ок}} \cdot q_{\text{ок}} \cdot B_{\text{ок}}, \quad (8)$$

где  $F_{\text{ок}}$  — площадь светового проема;  $q_{\text{ок}}$  — удельный тепловой поток через остекление, Вт/м<sup>2</sup>;  $B_{\text{ок}}$  — поправочный коэффициент влияния вида остекления.

Теплопритоки к поверхности льда от осветительных приборов можно найти с помощью приближенной зависимости:

$$Q_{\text{т.св}}^{\text{н}} = 0,6 \cdot F_{\text{л}} \cdot q_{\text{осв}}, \quad (9)$$

где  $q_{\text{осв}}$  — удельные тепловыделения от световых приборов, Вт/м<sup>2</sup>.

Теплопритоки от людей на льду и в прилегающих зонах устанавливают по формуле:

$$Q_{\text{т.люд}} = n \cdot q_{\text{люд}}, \quad (10)$$

где  $n$  — количество спортсменов и судей;  $q_{\text{люд}}$  — удельные тепловыделения от людей, Вт.

Необходимый объемный расход подаваемого воздуха определяется из условий равномерного заполнения зоны ледового поля приточным воздухом и создания предпосылок для понижения температуры притока до требуемого значения у поверхности льда. Подвижность воздуха у поверхности льда ограничивается величиной 0,3 м/с, в противном случае в зонах превышения этого показателя качество льда ухудшается. Добиться выполнения этого требования возможно лишь при омывании ледового поля обратными потоками, индуцируемыми направленными струями. Расчет воздухораспределения при этом принято называть расчетом по обратному потоку, а за нормируемую скорость в обратном потоке принимается максимально допустимая скорость в обслуживаемой зоне.

Исходными данными при расчете микроклиматических параметров воздуха в обслуживаемой зоне помещений с искусственным льдом являются: расход притока (определенный из вышеупомянутых условий); температура и влажность наружного воздуха и воздуха в обслуживаемой зоне, которые зависят от вида проводимых мероприятий и климатической характеристики района строительства.

Расчет всех термодинамических параметров внутреннего воздуха производится путем последовательного решения уравнений (11)–(19), зная любые два из параметров можно определить остальные:

$$I = 1,005 \cdot t + (2500 + 1,8 \cdot t) \cdot d \cdot 10^{-3}, \quad (11)$$

где  $I$  — энтальпия воздуха, кДж/кг;  $t$  — температура воздуха, °C;  $d$  — влагосодержание воздуха, г/кг.

$$d = d' \cdot 10^3 = 622 \cdot \frac{p_{\text{п}}}{(P_{\text{б}} - p_{\text{п}})}, \quad (12)$$

где  $d'$  — влагосодержание воздуха, кг/кг;  $p_{\text{п}}$  — парциальное давление водяного пара в воздухе, Па;  $P_{\text{б}}$  — барометрическое давление, Па (при отсутствии данный показатель принимается равным  $P_{\text{б}} = 101\,325$  Па);

$$d = d' \cdot 10^3 = 622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{\text{п}}}{(P_{\text{б}} - \varphi \cdot p_{\text{п}})}; \quad (13)$$

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}} \cdot 100 \%, \quad (14)$$

где  $p_{\text{н}}$  — парциальное давление насыщенного водяного пара (давление насыщения), Па;  $p_{\text{п}}$  — парциальное давление водяного пара в воздухе, Па.

При температуре больше 0 °C:

$$p_{\text{н}} = 0,6112 \cdot e^{\frac{17,504 \cdot t}{241,2 + t}}. \quad (15)$$

При температуре от 0 °C и менее:

$$p_{\text{н}} = 0,6112 \cdot e^{\frac{22,489 \cdot t}{272,88 + t}}, \quad (16)$$

где  $p_n$  — парциальное давление насыщенного водяного пара или давление насыщения, Па;  $t$  — температура воздуха, °С.

$$\rho_v = \frac{353 - 1,32 \cdot 10^{-3} \cdot p_n}{T}, \quad (17)$$

где  $p_n$  — парциальное давление водяного пара в воздухе, Па;  $T$  — температура воздуха, К;

$$c_{в.в.} = c_v + c_n \cdot d \cdot 10^{-3} = 1,8 + 1,005 \cdot d \cdot 10^{-3}, \quad (18)$$

где  $c_v$  — средняя удельная теплоемкость сухого воздуха, кДж/(кг·град);  $c_n$  — средняя удельная теплоемкость водяного пара, кДж/(кг·град);  $d$  — влагосодержание воздуха, г/кг.

Температура точки росы определяется по формуле:

$$t_p = \frac{\left[ 237,7 \cdot \left( \frac{17,27 \cdot t_b}{237 + t_b} + \ln \left( \frac{\varphi_v}{100} \right) \right) \right]}{\left[ 17,27 - \left( \frac{17,27 \cdot t_b}{237 + t_b} + \ln \left( \frac{\varphi_v}{100} \right) \right) \right]}, \quad (19)$$

где  $t_b$  — температура воздуха, °С;  $\varphi_v$  — относительная влажность воздуха, %.

Как отмечалось в работах [15–18], в существующих методиках, основывающихся на графоаналитическом построении процессов обработки воздуха на  $Id$ -диаграмме, расчет начинают с нанесения точек Н и Вл, параметры которых соответствуют параметрам наружного и внутреннего воздуха. Однако считается, что приток, подаваемый в направлении ледового поля сосредоточенными струями, охлаждается при постоянном влагосодержании. Исследования, приведенные в трудах [6, 14, 19], показывают, что это не соответствует действительности. В этой связи для учета влияния ассимиляции избытков влаги на процесс изменения параметров приточного воздуха в обслуживаемой зоне допустимо применять построение луча процесса с угловым коэффициентом, связывающим начальные и конечные значения параметров воздуха. Для этого необходимо определить тепловлагопоступления к внутреннему воздуху. Первая величина устанавливается по уравнению (2), для расчета второй составляющей в инженерной практике принято использовать аналогичную зависимость:

$$W_{я} = \beta(p_{пов} - p_v)F, \quad (20)$$

где  $\beta$  — коэффициент массоотдачи, кг/(ч·м<sup>2</sup>·Па);  $p_{пов}$  — парциальное давление воздуха при температуре жидкости, Па;  $p_v$  — парциальное давление воздуха в обслуживаемой зоне, Па;  $F$  — площадь поверхности льда, м<sup>2</sup>.

Соотношение (20) аналогично закону Ньютона – Рихмана, следовательно, процессы конвективного тепло- и массообмена описываются аналогичными дифференциальными уравнениями и, согласно тройной аналогии, можно определить количественную связь между коэффициентами тепло-

и массоотдачи. Поскольку концентрация воды в воздухе у ледового покрытия незначительно изменяется по нормали к межфазной поверхности, для рассматриваемой задачи представляется допустимым применить случай малой интенсивности массообмена, который характеризуется почти полным отсутствием влияния поперечного потока массы на течение смеси влажного воздуха. Подробно тройная аналогия для процессов теплообмена рассматривалась в работе [20], в которой отмечалось, что для рассматриваемой задачи вынужденной конвекции критериальные уравнения примут вид:

$$\begin{aligned} Nu &= f(Re, Pr); \\ Nu_D &= f(Re, Pr_D), \end{aligned} \quad (21)$$

где  $Re$ ,  $Pr$  и  $Pr_D$  — соответственно критерий Рейнольдса, критерий Прандтля и диффузионный критерий Прандтля.

Омывание поверхности ледового поля вентиляционным воздухом представляет собой частный случай омывания плоской пластины, для которого можно записать:

$$\overline{Nu} = 0,66Re^{1/2}Pr^{1/3}, \quad (22)$$

где  $\overline{Nu}$  — средний по характерному размеру критерий Нуссельта.

Для записи критериального уравнения массообмена необходимо тепловой критерий Прандтля заменить на диффузионный:

$$\overline{Nu}_D = 0,66Re^{1/2}Pr_D^{1/3}, \quad (23)$$

В формулах (22) и (23) критерии подобия определяются следующим образом:

$$\overline{Nu}_D = \frac{\beta l}{\rho D}; \quad \overline{Nu} = \frac{\alpha l}{\lambda}; \quad Re = \frac{w_b l}{\nu_b}, \quad (24)$$

где  $l$  — характерный размер (длина поверхности), м;  $D$  — коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности газовой смеси, Вт/(м·К);  $w_b$  — скорость газовой смеси, м/с;  $\nu_b$  — кинематический коэффициент вязкости газовой смеси, м<sup>2</sup>/с.

В рассматриваемой задаче под газовой смесью понимается смесь воздуха с частицами водяного пара, где воздух считается газом постоянного состава. В этом случае коэффициент диффузии можно определить с помощью зависимости [20]:

$$D = D_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1,8} \cdot \frac{p_0}{p}, \quad (25)$$

где  $D_0$  — коэффициент диффузии при условиях  $T_0 = 273$  К,  $p_0 = 0,101$  МПа ( $D_0 = 0,216 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с);  $T$  и  $p$  — соответственно температура и давление смеси для произвольных условий.

Таким образом, согласно работе [20], при обтекании плоской пластины воздушной смесью допустимо с достаточной точностью считать, что коэффи-

коэффициенты тепло- и массообмена связаны между собой соотношением:

$$\beta = \frac{\alpha}{c_p}, \quad (26)$$

где  $c_p$  — теплоемкость влажного воздуха, Дж/(кг·К), если считать, что смесь влажного воздуха имеет постоянный состав, то ее теплоемкость можно определить по формуле:

$$c_p = \sum_{i=1}^n c_{pi} c_i = c_{p1} c_{вн} + c_{p2} c_{в}, \quad (27)$$

где  $c_{вн}$  и  $c_{в}$  — соответственно массовые концентрации водяного пара и воздуха, кДж/(кг·К).

Таким образом, зная величину коэффициента массообмена, можно найти объем влагопоступления к воздуху над поверхностью льда.

Поскольку для рассматриваемых объектов рекомендуется предусматривать рециркуляцию воздуха, что снижает энергетические затраты при его обработке [9, 16–18], большой интерес вызывает задача определения параметров воздуха после смешивания. В настоящий момент существует три способа организации воздухообмена зоны ледового поля по схемам «сверху–вверх», «сверху–вниз» и смешанной схеме, подробно они описаны в трудах [7, 9, 15–17].

Применительно к данной задаче нас интересует вопрос размещения воздухозаборных устройств для рециркуляции, которая может осуществляться как из верхней, так и из нижней зон, а также совместно. От этого зависят не только параметры смеси, но и дальнейшие расходы холода и теплоты на обработку приточного воздуха. Наиболее трудоемкими вычисления будут для смешанной схемы воздухо-

обмена, это связано с необходимостью определения соотношения объемов рециркуляционного воздуха, отбираемого совместно из верхней и нижней зон. При этом представляется целесообразным стремиться привести влагосодержание воздуха после второй ступени рециркуляции к значению, равному или максимально близкому к влагосодержанию приточного воздуха. В этом случае при равенстве названных параметров не требуется дополнительное осушение или увлажнение воздуха перед его подогревом в калорифере. Если добиться равенства влагосодержания проблематично, следует выбрать такое соотношение рециркуляционных расходов, при котором разница влагосодержания будет минимальной.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для учета всех упомянутых факторов была разработана методика аналитического расчета параметров состояния воздуха при вентиляции и кондиционировании обслуживаемой зоны над ледовым полем, структурная блок-схема которой приведена на рис. 1.

На основании приведенной выше методики разработана программа расчета параметров состояния воздуха в зоне ледового поля. Реализация программной части выполнялась на высокоуровневом свободном объектно-ориентированном языке программирования Python. Данное приложение имеет модульную архитектуру, которая является сложной в плане разработки, но позволяет развивать программный продукт, добавляя новые функциональные возможности и корректируя уже реализованные, не изменяя архитектуры всего программного продукта, а затрагивая лишь его отдельные компоненты — независимые модули. Пример работы программы показан на рис. 2.

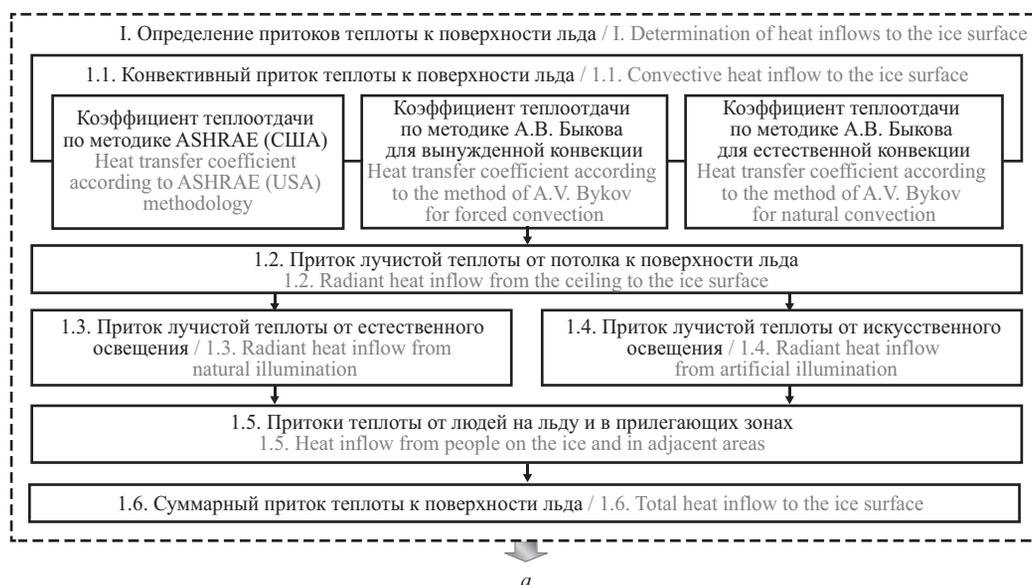


Рис. 1. Структурная блок-схема методики расчета параметров состояния воздуха: *a* — определение притоков теплоты к поверхности льда; *b* — определение параметров состояния воздуха; *c* — определение расходов теплоты и холода в центральном кондиционере

Fig. 1. Structural block diagram of the methodology for calculation of air condition parameters: *a* — determination of heat inflows to the ice surface; *b* — determination of air condition parameters; *c* — determination of heat and cold consumption in the central air conditioner

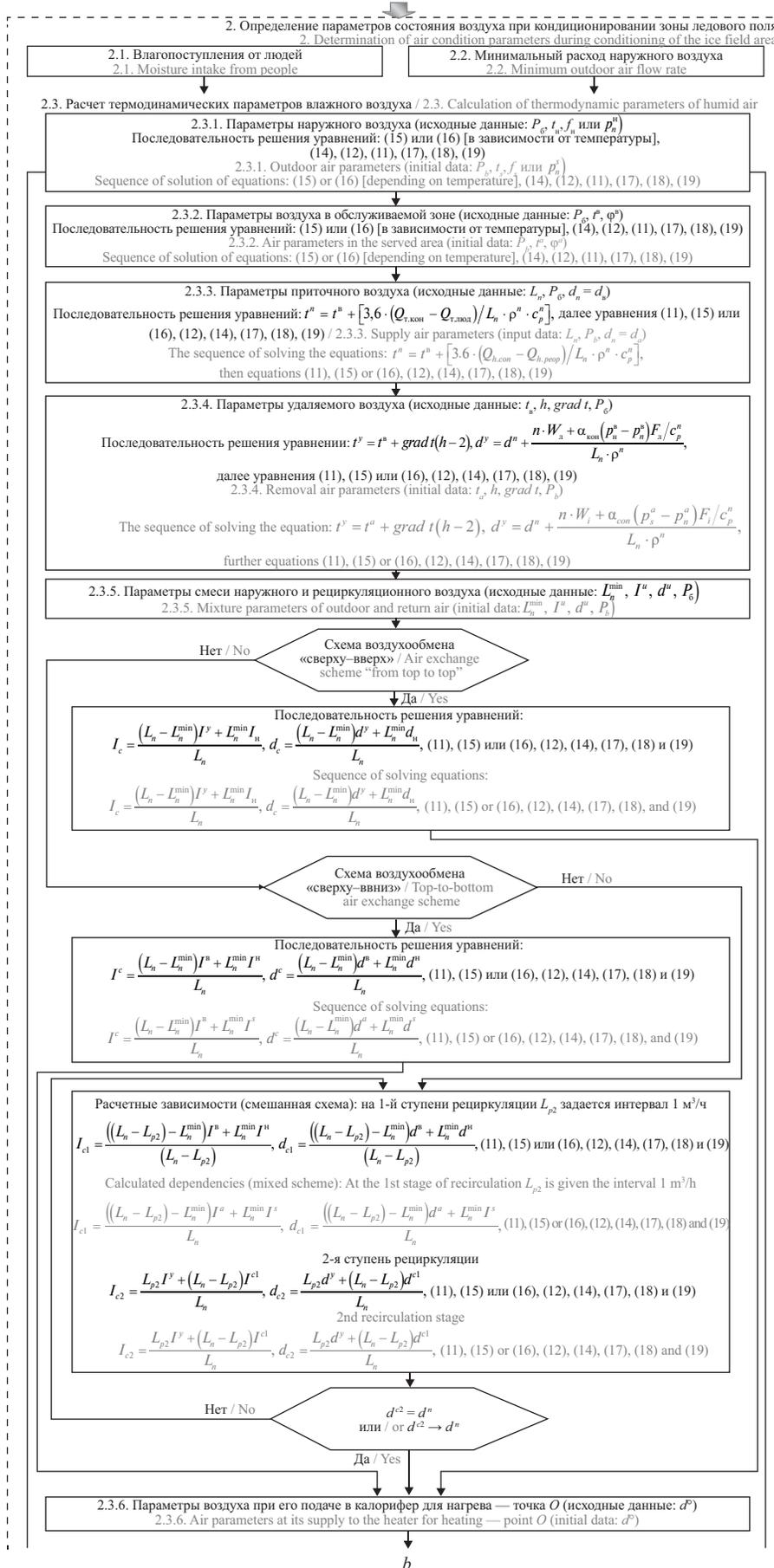
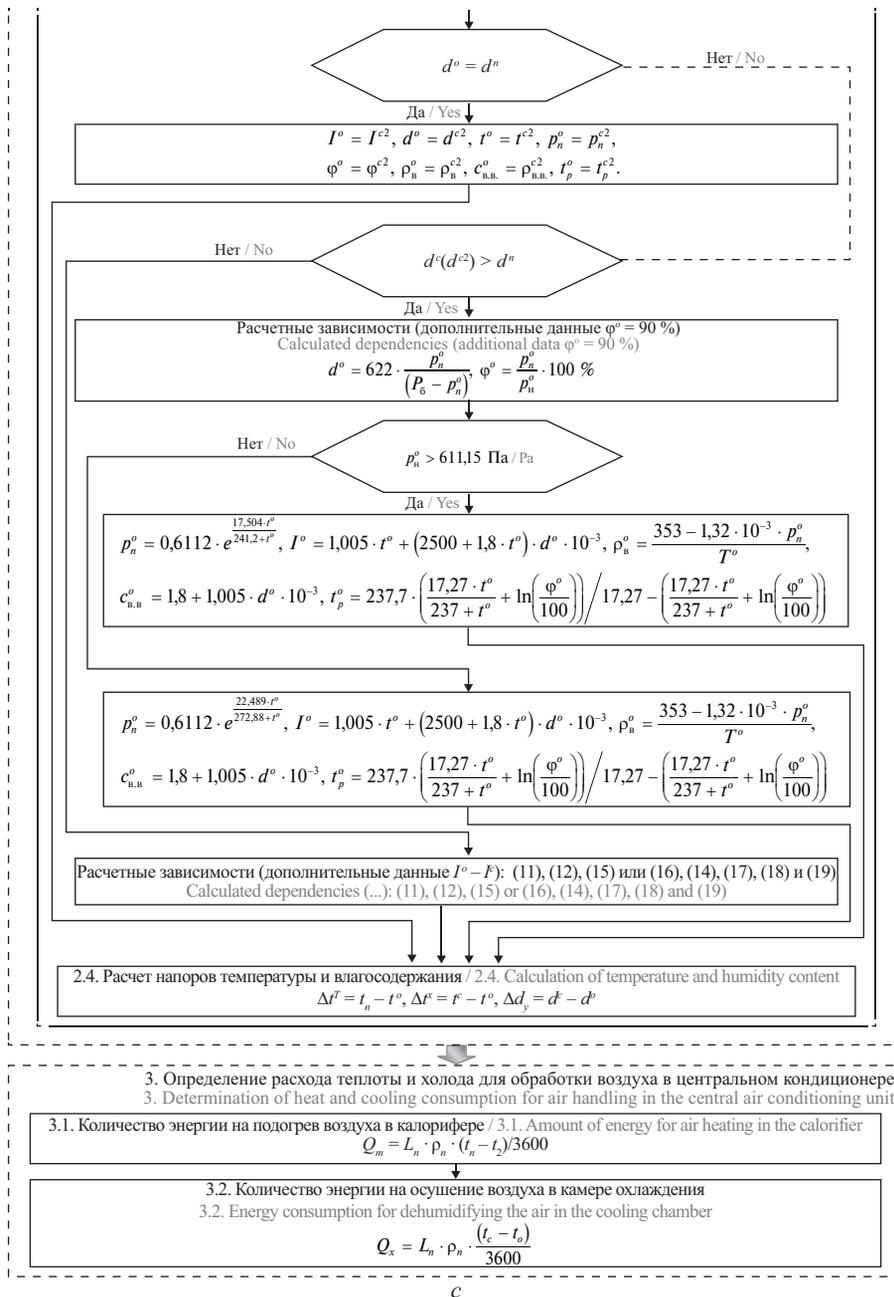


Рис. 1. Структурная блок-схема методики расчета параметров состояния воздуха: a — определение притоков теплоты к поверхности льда; b — определение параметров состояния воздуха; c — определение расходов теплоты и холода в центральном кондиционере (продолжение)  
Fig. 1. Structural block diagram of the methodology for calculation of air condition parameters: a — determination of heat inflows to the ice surface; b — determination of air condition parameters; c — determination of heat and cold consumption in the central air conditioner (continuation)



**Рис. 1.** Структурная блок-схема методики расчета параметров состояния воздуха: *a* — определение притоков теплоты к поверхности льда; *b* — определение параметров состояния воздуха; *c* — определение расходов теплоты и холода в центральном кондиционере (окончание)

**Fig. 1.** Structural block diagram of the methodology for calculation of air condition parameters: *a* — determination of heat inflows to the ice surface; *b* — determination of air condition parameters; *c* — determination of heat and cold consumption in the central air conditioner (ending)

Разработанная программа позволяет определять не только параметры состояния влажного воздуха при организации кондиционирования зоны ледового поля, но и рассчитывать затраты холода и теплоты на его обработку при различных схемах организации воздухообмена. Кроме того, для смешанной схемы осуществляется итерационный расчет оптимального соотношения объемов рециркуляционного воздуха, отбираемого из различных зон с отличающимися значениями температуры и влагосодержания.

Анализ приведенных на рис. 2, с результатов расчета показывает, что при воздухообмене в холодный

период года по смешанной схеме энергетические затраты на обработку приточного воздуха в центральном кондиционере значительно уменьшаются. Например, может не потребоваться дополнительное охлаждение подаваемого воздуха для его осушения, которого можно добиться путем выбора требуемого соотношения объемов рециркуляционного воздуха из верхней и рабочей зоны. Однако в теплый период года применение данной схемы может увеличивать затраты холода и теплоты по сравнению со схемой «сверху–вниз». По этой причине при круглогодичной эксплуатации помещений с искусственным льдом распределение

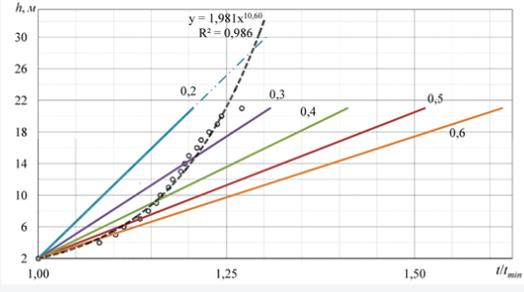
**Расчет тепловых притоков к поверхности ледового поля**

Температура воздуха в зоне ледового поля	10	°C	Поправочный коэфф. влияния вида остекления	0	-
Температура поверхности льда	-6	°C	Коэфф. поглощения слоя льда	0,5	-
Площадь ледового поля	1800	м2	Расход приточного воздуха	17000	м3/ч
Скорость воздуха у поверхности ледового поля	0,25	м/с	Количество спортсменов и судей	50	чел
Коэфф. теплопроводности воздуха	0,0251	Вт/(м·°C)	Удельные тепловыделения от людей	180	Вт/чел
Кинематический коэфф. вязкости воздуха (x10-6)	14,16	м2/с	Удельные влаговыведения от людей	170	г/(чел·ч)
Среднемесячная скорость ветра в расчетный период	0,25	м/с	Удельные расход наружного воздуха на человека	80	м3/(чел·ч)
Линейный размер поля в направлении движения ветра	30	м	Удельные тепловыделения от световых приборов	35,7	Вт/м2
Коэфф. влаговыведения	1	-	Излучение черного тела	5,67	Вт/(м2·К4)
Коэфф. отражения	0,6	-	Площадь светового проема	0	м2
Коэфф. облучения	0,5	-	Количество спортсменов и занимающихся	50	чел.

a

**Расчет параметров состояния воздуха в зоны ледового поля**

Температура наружного воздуха	-7,5	°C
Парциальное давление пара в наружном воздухе	290	Па
Барометрическое давление	101325	Па
Относительная влажность воздуха в зоне ледового поля	46	%
Относительная влажность наружного воздуха	89	%
Градиент температуры выше обслуживаемой зоны	0,3	°C/м
Высота помещения	15	м



b

Рис. 2. Пример работы программы: a — блок ввода исходных данных для теплового расчета; b — блок ввода исходных данных для расчета параметров состояния; c — блок вывода данных расчета

Fig. 2. Example of programme operation: a — input block of initial data for thermal calculation; b — input block of initial data for calculation of state parameters; c — calculation data output block

## Вывод данных расчета

Точки	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$d, \text{г/кг}$	$I, \text{Дж/кг}$	$\varphi, \%$	$t_p, ^\circ\text{C}$	$p_6, \text{кПа}$	$L^H, \text{м}^3/\text{ч}$	$L^{P1}, \text{м}^3/\text{ч}$	$L^{P2}, \text{м}^3/\text{ч}$	$Q^{\text{вот}}, \text{Вт}$	$Q_T, \text{Вт}$	$Q_X, \text{Вт}$	$G, \text{кг/ч}$
<i>Схема «сверху-вверх»</i>														
Н	-7,5	1,32	1,78	-3,15	89	-8,7	0,29	2000	15000	-	92880	93790	63200	-
П	13,4	1,23	2,65	20,21	28	-4,2	0,430							
ВЛ	6,0	1,27	2,65	12,7	46	-4,2	0,430							
У	9,5	1,25	3,10	17,4	42	-2,4	0,503							
С'	7,5	1,26	2,90	14,9	46	-2,9	0,480							
О	-2,9	1,30	2,65	3,59	90	-4,2	0,429							
<i>Схема «сверху-вниз»</i>														
Н	-7,5	1,32	1,78	-3,15	89	-8,7	0,29	2000	15000	-	92880	53400	-	2,04
П	13,4	1,23	2,65	20,21	28	-4,2	0,430							
ВЛ	6,0	1,27	2,65	12,7	46	-4,2	0,430							
У	6,0	1,27	2,65	12,7	46	-4,2	0,430							
С'	4,4	1,27	2,55	10,8	49	-4,7	0,410							
О	4,1	1,27	2,65	10,8	52	-4,2	0,43							
<i>Смешанная схема</i>														
Н	-7,5	1,32	1,78	-3,15	89	-8,7	0,29	2000	10500	4500	92880	46580	-	-
П	13,4	1,23	2,65	20,21	28	-4,2	0,430							
ВЛ	6,0	1,27	2,65	12,7	46	-4,2	0,430							
У1	6,0	1,27	2,65	12,7	46	-4,2	0,430							
У2	9,5	1,25	3,10	17,4	42	-2,4	0,503							
С'	3,8	1,27	2,51	10,15	50	-4,8	0,410							
С''	5,3	1,27	2,65	17,4	42	-4,1	0,430							
О	5,3	1,27	2,65	17,4	42	-4,1	0,430							

с

Рис. 2. Пример работы программы: а — блок ввода исходных данных для теплового расчета; б — блок ввода исходных данных для расчета параметров состояния; с — блок вывода данных расчета (окончание)

Fig. 2. Example of programme operation: a — input block of initial data for thermal calculation; b — input block of initial data for calculation of state parameters; c — calculation data output block (ending)

воздуха в теплый и холодный периоды года необходимо осуществлять по различным схемам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанная аналитическая методика и программа расчета параметров состояния влажного воздуха дает возможность повысить точность расчета температуры, влагосодержания, парциального давления и энтальпии при проектировании систем вентиляции и кондиционирования помещений с искусственным льдом. Это способствует сокращению избыточных энергетических затрат при обработке

воздуха в центральном кондиционере. Отличительной особенностью предложенной методики является применение итерационного метода расчета при выборе оптимального соотношения расходов воздуха на первой и второй ступенях рециркуляции, что позволяет исключить при определенных условиях дополнительное охлаждение притока в холодный период года. Кроме того, использование тройной аналогии при рассмотрении конвективного тепло-массообмена внутреннего воздуха с поверхностью льда позволило повысить точность расчета влагопоступлений к удаляемому воздуху за счет введения поправки к влагосодержанию.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Levy J.I., Lee K., Yanagisawa Y., Hutchinson P., Spengler J.D. Determinants of nitrogen dioxide concentrations in indoor ice skating rinks // American Public Health Association. 1998. Vol. 88. Issue 12. Pp. 1781–1786. DOI: 10.2105/ajph.88.12.1781

2. Yang C., Demokritou P., Chen Q., Spengler J. Ventilation and air quality in indoor ice skating arenas // ASHRAE Transactions. 2000. Vol. 106. Pp. 4405–4414.

3. Ivanov Y., Novikov N. Dual-channel digital control of energy consumption and air supply in micro-

climate systems of livestock premises // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 937. Issue 3. P. 032002. DOI: 10.1088/1755-1315/937/3/032002

4. 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. С. 10. EDN TOBGVX.

5. Khaled M., Ali S., Jaber H., Faraj J., Murr R., Lemend T. Heating/cooling fresh air using hot/cold exhaust air of heating, ventilating, and air conditioning systems // *Energies*. 2022. Vol. 15. Issue 5. P. 1877. DOI: 10.3390/en15051877
6. 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. EDN PZVPRB.
7. Вишневецкий Е.П. Вентиляция и качество воздуха в крытых ледовых аренах // *СОК*. 2008. № 10. С. 34–39.
8. Денисихина Д.М. Исследование различных схем воздухораспределения ледовых арен // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2015. № 5 (677). С. 38–48. EDN UBLRPF.
9. Кокорин О.Я. Инженерные системы помещений с искусственным льдом или снегом. М. : КУРС, 2022. 240 с.
10. Кокорин О.Я., Товарас Н.В. Снижение энергопотребления в системах кондиционирования воздуха для помещений с искусственными ледовыми полями // *Холодильная техника*. 2012. № 12. С. 12–15. EDN SEKLYR.
11. Дячек П.И., Ливанский Д.Г. Температурная неоднородность поверхности ледового поля крытых искусственных катков // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2010. № 2. С. 41–47.
12. Тарасова Е.В., Штым А.С. Изменение термодинамических параметров охлажденного воздуха при прямом контакте с естественным источником холода // *Вестник гражданских инженеров*. 2012. № 6 (35). С. 107–112. EDN QZATVX.
13. Каутский А.А. Регулирование и контроль температуры льда искусственного катка // *Холодильная техника*. 1975. № 11. С. 51–52.
14. 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.
15. Chuykin S.V., Glazkov S.S. Determination of the heat return coefficient of the ice surface for the mixed air distribution scheme // *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2013. Vol. 3 (19). Pp. 29–38. EDN QLHSSJ.
16. Chuykin S.V. Problems of developing methods of designing microclimate systems for premises with artificial // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2022. Vol. 4 (56). Pp. 18–28. DOI: 10.36622/VSTU.2022.56.4.002. EDN QJMDQJ.
17. Melkumov V.N., Chuykin S.V. A scheme and method of calculation for ventilation and air conditioning systems of ice arenas // *Journal of Technology*. 2017. Vol. 32. Issue 2. Pp. 139–146.
18. 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. Vol. 3 (19). Pp. 17–28. EDN QLHSRZ.
19. Старкова Л.Г., Анисимова Е.Ю., Сорокина Н.Г., Дегтярь С.Л. Анализ схем вентиляции крытого катка с помощью числовой модели воздушных потоков // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2021. Т. 21. № 3. С. 42–50. DOI: 10.14529/build210306
20. Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен. М. : Изд-во МЭИ, 2005. 550 с.

Поступила в редакцию 12 мая 2023 г.

Принята в доработанном виде 15 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 2 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: Сергей Владимирович Чуйкин — кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики; Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84; SPIN-код: 4528-7170, Scopus: 57216439704, ResearcherID: R-3144-2016, ORCID: 0000-0001-6040-323X; ser.chu@mail.ru.

## REFERENCES

1. Levy J.I., Lee K., Yanagisawa Y., Hutchinson P., Spengler J.D. Determinants of nitrogen dioxide concentrations in indoor ice skating rinks. *American Public Health Association*. 1998; 88(12):1781-1786. DOI: 10.2105/ajph.88.12.1781
2. Yang C., Demokritou P., Chen Q., Spengler J. Ventilation and air quality in indoor ice skating arenas. *ASHRAE Transactions*. 2000; 106:4405-4414.
3. Ivanov Y., Novikov N. Dual-channel digital control of energy consumption and air supply in microclimate systems of livestock premises. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 937(3):032002. DOI: 10.1088/1755-1315/937/3/032002
4. Rusakov S. To calculation of thermal and moist loadings ice skating rinks loading from radiant heat transfer. *Scientific Journal of St. Petersburg State University of Low*

*Temperature and Food Technologies: Refrigeration and Air Conditioning*. 2014; 1:10. EDN TOBGVX. (rus.).

5. Khaled M., Ali S., Jaber H., Faraj J., Murr R., Lemenand T. Heating/cooling fresh air using hot/cold exhaust air of heating, ventilating, and air conditioning systems. *Energies*. 2022; 15(5):1877. DOI: 10.3390/en15051877

6. Anisimov S.M., Denisikhina D.M., Polushkin V.I. The solution of the problem of turbulent transfer of momentum, heat and scalar in the volume of the ice arena “bowl”. *Bulletin of Civil Engineers*. 2012; 5(34):149-155. EDN PZVPRB. (rus.).

7. Vishnevsky E.P. Ventilation and air quality in indoor ice arenas. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2008; 10:34-39. (rus.).

8. Denisikhina D.M. Research of different air distribution schemes in ice rink arena. *News of higher educational institutions. Construction*. 2015; 5(677):38-48. EDN UBLRPF. (rus.).

9. Kokorin O.Ya. *Engineering systems of rooms with artificial ice and snow*. Moscow, KURS Publ., 2022; 240. (rus.).

10. Kokorin O.Ya., Tovaras N.V. Reduction of energy consumption in air conditioning systems for rooms with artificial ice fields. *Refrigerating equipment*. 2012; 12:12-15. EDN SEKLYR. (rus.).

11. Diachek P.I., Livansky D.G. Temperature non-uniformity of ice-field surface at covered skating-rinks. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2010; 2:41-47. (rus.).

12. Tarasova E.V., Shtym A.S. Alteration of thermodynamic parameters of the cooled air in direct contact with a natural source of cold. *Bulletin of Civil Engineers*. 2012; 6:107-112. EDN QZATVX. (rus.).

Received May 12, 2023.

Adopted in revised form on May 15, 2023.

Approved for publication on September 2, 2023.

**BIONOTES:** **Sergey V. Chuykin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Mechanics; **Voronezh State Technical University (VSTU)**; 84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh, 394006, Russian Federation; SPIN-code: 4528-7170, Scopus: 57216439704, ResearcherID: R-3144-2016, ORCID: 0000-0001-6040-323X; ser.chu@mail.ru.

13. Kautskij A.A. Regulation and control of the ice temperature of an artificial ice rink. *Refrigerating Equipment*. 1975; 11:51-52. (rus.).

14. Pukhal V.A., Yustus D.A. Air distribution in spectator ice arenas. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015; 12(39):7-31. EDN VJPKGD. (rus.).

15. Chuykin S.V., Glazkov S.S. Determination of the heat return coefficient of the ice surface for the mixed air distribution scheme. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2013; 3(19):29-38. EDN QLHSSJ.

16. Chuykin S.V. Problems of developing methods of designing microclimate systems for premises with artificial. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2022; 4(56):18-28. DOI: 10.36622/VSTU.2022.56.4.002. EDN QJMDOJ.

17. Melkumov V.N., Chuykin 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.

18. 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.

19. Starkova L.G., Anisimova E.Yu., Sorokina N.G., Deg-tiar S.L. Analysis of ventilation schemes for indoor ice skating rinks using a numerical air flow model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2021. 21(3):42-50. DOI: 10.14529/build210306 (rus.).

20. Tsvetkov F.F. *Heat and mass exchange*. Moscow, Publishing House of MEI, 2005; 550. (rus.).