

Многокритериальная оптимизация проектных решений систем обеспечения микроклимата помещений с искусственным льдом

С. В. Чуйкин ¹ ✉, О. А. Куцыгина ¹

¹ Воронежский государственный технический университет
ул. 20-летия Октября, д. 84, г. Воронеж 394006, Российская Федерация

✉ e-mail: ser.chu@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Наиболее энергоемкими объектами для проведения спортивных и культурно-массовых мероприятий являются крытые катки и ледовые арены. Упрощенные технические решения при проектировании систем обеспечения микроклимата данных помещений приводят к значительным расходам при эксплуатации, что может вызвать серьезные отрицательные проявления в относительно короткий срок. В связи с этим, возрастает актуальность разработки методов выбора оптимального проектного решения названных систем. Целью статьи является разработка математической модели многокритериальной оптимизации проектных решений систем обеспечения микроклимата помещений с искусственным льдом.

Методы. Определение оптимального проектного решения систем обеспечения микроклимата по нескольким параметрам, каждый из которых может являться определяющим, является прикладной задачей системного анализа, основные принципы и закономерности которого были учтены при решении задачи многокритериальной оптимизации.

Результаты. Определен перечень частных критериев оптимальности, отражающих качественные и количественные характеристики проектных решений. Для поиска оптимального решения по выбранным частным критериям использована методика свертывания векторного критерия. Разработана оптимизационная модель, основывающаяся на принципах системного анализа.

Заключение. Разработанная математическая модель многокритериальной оптимизации позволяет обеспечить приоритет более важным частным критериям за счет увеличения их весов. В этом случае, следует помнить, что частные критерии должны быть соизмеримы, а значит, приведены к безразмерному виду. Поскольку в рассматриваемой задаче оптимизации имеют существенное значение абсолютные величины критериев, при выбранном векторе параметров необходимо выбрать именно аддитивный метод свертывания обобщенного критерия.

Ключевые слова: вентиляция; кондиционирование воздуха; ледовые арены; катки; системный анализ; многокритериальная оптимизация.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Чуйкин С. В., Куцыгина О. А. Многокритериальная оптимизация проектных решений систем обеспечения микроклимата помещений с искусственным льдом // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(2): 39-52. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-39-52>.

Поступила в редакцию 04.05.2022

Подписана в печать 17.06.2022

Опубликована 29.07.2022

Multicriteria Optimization of Design Solutions for Microclimate Systems for Rooms with Artificial Ice

Sergey V. Chuykin ¹ ✉, Olga A. Kutsygina ¹

¹ Voronezh State Technical University
84, 20th anniversary of October str., Voronezh 394006, Russian Federation

✉ e-mail: el.yatsun@gmail.com

Abstract

Purpose of research. The most energy-intensive facilities for holding sports and cultural events are indoor ice rinks and ice arenas. Simplified technical solutions when designing the systems for providing the microclimate of these structures lead to significant operating costs and can lead to serious negative consequences in a relatively short period. In this regard, the problem of developing methods for choosing the optimal design solution for these systems is becoming ever more urgent. The purpose of the article is to develop a mathematical model for multi-criteria optimization of design solutions for systems providing the microclimate of rooms with artificial ice.

Methods. Determining the optimal design solution for microclimate systems in terms of several parameters, each of which can be decisive, is an applied task of system analysis, the basic principles and patterns of which were taken into account when solving the problem of multicriteria optimization.

Results. A list of particular optimality criteria reflecting the qualitative and quantitative characteristics of design solutions has been determined. The method of vector criterion convolution has been used to search for the optimal solution for the selected particular criteria. An optimization model based on the principles of system analysis has been developed.

Conclusion. The developed mathematical model of multicriteria optimization makes it possible to provide priority to more important particular criteria by increasing their weights. In this case, it should be remembered that particular criteria must be commensurate, and, therefore, reduced to a dimensionless form. Since the absolute values of the criteria are essential in the optimization task under consideration, for the chosen vector of parameters, it is necessary to choose exactly the additive method of folding the generalized criterion.

Keywords: ventilation; air conditioning; ice arenas; skating rinks; system analysis; multicriteria optimization.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Chuykin S. V., Kutsygina O. A. Multicriteria Optimization of Design Solutions for Microclimate Systems for Rooms with Artificial Ice. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(2): 39-52 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-39-52>.

Received 04.05.2022

Accepted 17.06.2022

Published 29.07.2022

Введение

Современные объекты общественно-го назначения для проведения спортивных и культурно-массовых мероприятий представляют собой сложный комплекс инженерно-строительных систем и сооружений, к которым предъявляются жесткие архитектурно-строительные санитарно-гигиенические и энергосберегающие требования [1-5]. Наиболее энергоемкими объектами данного назначения являются крытые помещения с искусственным льдом, к которым относятся катки и ледовые арены.

Анализ существующих проектов показывает [6], что затраты на конструирование, строительство и эксплуатацию систем жизнеобеспечения данных объектов, к которым относятся системы холодоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, достигают весьма значительных величин. Это приводит к увеличению эксплуатационных расходов и уменьшению коммерческой прибыли. В случае нарушения технологического цикла функционирования помещений с искусственным льдом, например повышение относительной влажности и увеличение подвижности воздуха у ледового поля, в течение нескольких лет эксплуатации, может наблюдаться коррозия строительных конструкций, образование конденсата, и как следствие плесени на поверхностях и ограждениях. Кроме того, упрощенные технические решения при

проектировании названных инженерных систем часто приводят к значительным расходам при эксплуатации. Стремление к снижению капитальных и эксплуатационных затрат на системы обеспечения микроклимата может привести к серьезным отрицательным проявлениям в относительно короткий срок [4-6].

Как отмечается в [6], успешное функционирование крытых катков и ледовых арен в долгосрочной перспективе обеспечивается при покрытии избытками прибыли процентных взносов и выплат, а так же при содержании объекта и его инфраструктуры в надлежащем состоянии. Таким образом, необходимо определить оптимальное соотношение величины затрат на проектирование, строительство и эксплуатацию объектов рассматриваемого типа с учетом требований к обеспечению необходимых санитарно-гигиенических параметров внутреннего воздуха в зонах нахождения людей, предотвращению образования конденсата на строительных конструкциях сооружения и поддержанию необходимого качества поверхности льда.

Однако не представляется возможным найти прямую связь, например, между энергозатратами на обработку приточного воздуха в центральном кондиционере, концентрацией загрязняющих веществ в рабочей зоне и параметрами комфортного пребывания в помещении, причем каждый из возможных параметров или коэффициентов может являться определяющим при выборе

проектного решения в зависимости от технического задания на проектирование. В связи с этим, возрастает актуальность разработки методов выбора оптимального проектного решения систем обеспечения микроклимата, основывающегося на многокритериальном анализе [1, 2]. В связи с вышесказанным, целями данной статьи являются: выбор методики решения оптимизационной задачи; определение перечня частных критериев оптимальности, отражающих качественные и количественные характеристики проектных решений; разработка оптимизационной математической модели, основывающейся на принципах системного анализа.

Материалы и методы

Постановка задачи многокритериальной оптимизации проектных решений систем обеспечения микроклимата

В зависимости от вида взаимосвязи между переменными в модели оптимизационной задачи, она может решаться с помощью линейного, нелинейного, целочисленного, квадратичного, стохастического программирования. Согласно работам [7-11] решение задачи оптимизации проектных решений можно свести к выбору изменяемых параметров x , которые принадлежат допустимой области R , и обеспечивающих экстремальное значение выбранного критерия оптимальности $\Psi(x)$.

В общем виде, математическая модель в задачах многокритериальной оптимизации записывается в виде

$$\min_{x \in R} \Psi(x). \quad (1)$$

Подобным образом оптимизационная задача формулируется при наличии нелинейных ограничений, которые связывают изменяемые параметры x между собой, и называется задачей нелинейного программирования, где

$$R = \{x | g_i(x) \geq 0, i = 1, \dots, K\}. \quad (2)$$

Поскольку в рассматриваемой задаче необходимо найти наилучшее решение по нескольким противоречивым (увеличение одного приводит к уменьшению другого) частным критериям $\Psi_i(x)$, $i = 1, 2, \dots, N$, для совместного учета всей их совокупности принято рассматривать векторный критерий оптимальности

$$\Psi(x) = (\Psi_1(x), \Psi_2(x), \dots, \Psi_N(x)), \quad (3)$$

данная задача получила название векторной оптимизации [4, 5].

$$\min_{x \in R} \Psi_1(x), \dots, \min_{x \in R} \Psi_N(x). \quad (4)$$

Для решения задачи векторной оптимизации важное значение имеет качественная информация о множестве частных критериев [4, 5, 12], которая может быть задана в виде ряда приоритетов

$$\Psi_1 \succ \Psi_2 \succ \dots \succ \Psi_N, \quad (5)$$

т.е. критерий Ψ_1 более важен, чем критерий Ψ_2 , критерий Ψ_2 более важен, чем критерий Ψ_3 и т.п. Для учета важности частных критериев разработано несколько методик, наибольшее распространение из которых получили [7, 8, 12, 13]:

I. Методика последовательной оптимизации частных критериев с учетом жесткого приоритета, она так же получила название методики лексикографического упорядочения. Она характеризуется тем, что минимизация n -го критерия осуществляется только после получения минимального значения всех предыдущих $(n - 1)$ -ых частных критериев.

Основной недостаток данной методики заключается в вырождении в точку области удовлетворительных решений R . В связи с чем не представляется возможным учет менее важных критериев оптимальности, поскольку не допускается их увеличение (уменьшение), если это вызывает соответствующее уменьшение (увеличение) более важного критерия. Этот недостаток частично возможно сгладить за счет методики II [7, 8].

II. Методика последовательных уступок. Эта методика является своего рода модификацией предыдущей, а ее основная идея заключается в последовательном введении на каждом шаге оптимизации уступки $\Delta\Psi_{n-1}$, которая характеризует допустимое отклонение $(n - 1)$ -ого критерия от его минимального значения [7, 8, 12].

Введение упомянутой уступки наиболее важному частному критерию приводит к возможности улучшения менее важного критерия оптимальности. В то же время видно, при какой именно уступке по $(n - 1)$ -му критерию достигается тот или иной положительный результат.

III. Методика выделения главного критерия. Ее основной принцип заключается в поиске минимума наиболее важного или главного критерия оптимальности $\Psi_1(x)$, а значения других критериев $\Psi_2(x)$, $\Psi_3(x)$ и т.д. не должны превышать определенных пороговых значений. Таким образом, формулируемая задача записывается в виде

$$\min_{x \in R'} \Psi_1(x), \quad (6)$$

$$R' = R \cap R_0; R_0 = \{x | g_i(x) \leq g_i^0, i = \overline{2, N}\}. \quad (7)$$

Как отмечается в работах [7-12] данная задача эквивалентна задаче параметрической оптимизации. При этом основной трудностью применения данного метода является поиск (определение) порогового значения g_i^0 , для вычисления которого необходимо применять специальные методы.

Упомянутые выше три метода учета важности критериев оптимальности предполагают наличие превосходящего над остальными критерия, однако при решении поставленной задачи оптимизации проектных решений систем обеспечения микроклимата не всегда можно выделить доминирующий критерий, по этой причине следует рассмотреть и другие варианты свертывания.

IV. Методика гарантированного результата, для которой характерно изменение наихудшего критерия до уровня основных критериев, в результате данная задача эквивалентна задаче параметрической оптимизации, реализуемой методами уступок с упомянутыми недостатками

для рассматриваемой в данной работе задачи оптимизации.

V. Методика равенства частных критериев. Характеризуется равноценностью по важности частных критериев оптимальности. В связи с этим стремятся уравнивать все значения критериев между собой, а сама задача записывается в виде

$$\min_{x \in R} \Psi_k(x), \quad (8)$$

$$R_1(x) = R_2(x) = \dots = R_k(x). \quad (9)$$

Как отмечается в работе [5] основным недостатком данного метода является неразрешимость задачи (8), либо ее оптимальное решение не будет являться эффективной точкой для исходной задачи векторной оптимизации.

VI. Методика идеальной точки, характеризуется необходимостью задания дополнительной информации в виде идеального решения, а исходная задача решается путем построения обобщенного критерия и однокритериальной задачи оптимизации [12], которая обеспечивает наибольшее совпадение с идеальным решением. Данный метод свертывания так же не может быть применен при решении рассматриваемой задачи, поскольку не существует идеального варианта проектного решения систем обеспечения микроклимата.

VII. Методика свертывания векторного критерия. Является наиболее предпочтительной для рассматриваемой задачи. Она так же получила широкое распространение при решении и других оптимизационных задач [7, 12-20 и др.].

Суть методики заключается в объединении частных критериев оптимальности в один интегральный критерий, после чего определяется минимум или максимум этого критерия. Осуществление объединения частных критериев на основе их объектной взаимосвязи зачастую невозможно из-за большого различия физической интерпретации рассматриваемых при проектировании тепловых сетей параметров. В связи с этим, обобщенный критерий является формальным частных критериев.

В данной методике важность критерия учитывается за счет построения скалярной функции S , которая является обобщенным критерием векторного критерия $\Psi(x)$

$$\min_{(x \in R)} S(\chi, \Psi(x)), \quad (10)$$

где $\chi = (\chi_1, \dots, \chi_n)$ – вектор весов частных критериев [6, 7, 12 и др.].

Как отмечается в работах [7, 8, 12], обобщенный критерий может быть представлен функциями S различного типа, например:

а) среднестепенной критерий, представляется как функция

$$S_d(\chi, \Psi(x)) = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \chi_i \Psi_i^d(x) \right)^{1/d}, d > 0; \quad (11)$$

б) логические критерии оптимальности, представляются в виде функции

$$S_{\max}(\chi, \Psi(x)) = \max_{1 \leq i \leq N} \{ \chi_i \Psi_i(x) \}; \quad (12)$$

$$S_{\min}(\chi, \Psi(x)) = \max_{1 \leq i \leq N} \{ \chi_i \Psi_i(x) \}; \quad (13)$$

в) мультипликативный критерий оптимальности, представляется в виде функции

$$S_{\Sigma}(\chi, \Psi(x)) = \prod_{i=1}^N \chi_i \Psi_i(x). \quad (14)$$

Данный обобщенный критерий оптимальности, при условии неравнозначности частных критериев, образуется за счет перемножения произведения этих частных критериев и их весовых значений $\chi_i \Psi_i$ между собой. В работе [17] отмечается, что плюсом данного вида обобщенного критерия является то, что при его свертывании не требуется нормировать частные критерии оптимальности, так же в большинстве случаев можно определить одно оптимальное решение.

К минусам можно отнести взаимную компенсацию частных критериев, в результате чего наблюдается тенденция сглаживания уровней частных критериев, кроме того применение данного вида свертывания предполагает перемножение критериев с разной размерностью, т.е. имеющих различную природу [18].

г) аддитивный критерий оптимальности, представляется в виде функции

$$S_{\Sigma}(\chi, \Psi(x)) = \sum_{i=1}^N \chi_i \Psi_i(x). \quad (15)$$

Данный обобщенный критерий оптимальности получается путем сложения нормированных значений частных критериев. Так же этот метод называют методом взвешенных сумм, он позволяет обеспечить приоритет более важным частным критериям за счет увеличения

их весов. В этом случае следует помнить, что частные критерии должны быть соизмеримы, а значит, приведены к безразмерному виду.

Из уравнения (15) видно, что второй немаловажной задачей при решении оптимизационной задачи с помощью данного метода, является определение весового показателя χ_i частного критерия Ψ_i . Данный параметр определяет важность i -го критерия, и задает количественное предпочтение этого критерия над остальными.

В случае равноценности выбранных частных критериев, вес каждого критерия принимается одинаковым, для неравноценных – вес или приоритет, выбирают в соответствии с важностью критерия

$$\chi_i > 0, \sum_{i=1}^m \chi_i = 1, i = 1, 2, \dots, m. \quad (16)$$

Одним из способов определения веса частного критерия является методика ранжирования, которая характеризуется тем, что в качестве веса критерия выступает относительная частота преобразованных рангов, которые заносятся в табл.1.

После определения рангов вес критерия определяется по формуле

$$\chi_i = \frac{\sum_{j=1}^m \omega_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega_{ij}}, \quad (17)$$

где ω_{ij} – преобразованный ранг критерия оптимальности, получаемый путем назначения единицы критерию с мак-

симальным весом, двойке – следующему по значимости и так далее.

Наибольшую важность имеет критерий с минимальным значением отно-

сительной частоты рангов, что соответствует поиску минимума рассматриваемых критериев оптимальности.

Таблица 1. Преобразованные ранги рассматриваемых критериев оптимальности

Table 1. Transformed ranks of the optimality criteria under consideration

Эксперт / Expert	Преобразованный ранг критериев / Transformed rank of optimality criteria				χ_n
	χ_1	χ_2	χ_3	...	
1	Оценки 1-го эксперта				
2	Оценки 2-го эксперта				
3	Оценки 3-го эксперта				
...	...				
<i>n</i>	Оценки <i>n</i> -го эксперта				

Обоснование выбора критериев оптимальности при системном анализе проектных решений систем обеспечения микроклимата

Назначение частных критериев оптимальности для каждого отдельного случая является эвристически плохо формализованной задачей, а ее решение затрудняется необходимостью удовлетворения следующих отчасти противоречивых условий, приведенных на рис.1. Поскольку рассматриваемый объект исследований является сложной системой, зависящей от большого числа факторов, выбранный критерий оптимальности должен как можно лучше отражать ее основные характеристики, к которым относятся: капитальные затраты на сооружение K ; эксплуатационные затраты $\mathcal{E}$; эффективность воздухообмена $k_{эф}$ и санитарно-эпидемиологическая безопасность, ε .

Капитальные затраты на сооружение инженерной инфраструктуры, а также расходы при ее эксплуатации зависят от конструктивных решений систем жизнеобеспечения, выбора строительных и отделочных материалов, оборудования и пр., их величину можно найти по известным зависимостям. Данные критерии являются своего рода количественной характеристикой проектного решения. Однако в связи с возможным возникновением сложной санитарно-эпидемиологической обстановки в настоящее время существует потребность в рассмотрении параметров, которые могли бы описать качественные характеристики выбираемых решений, например показатель эффективности удаления загрязняющих веществ и коэффициент эффективности воздухообмена.

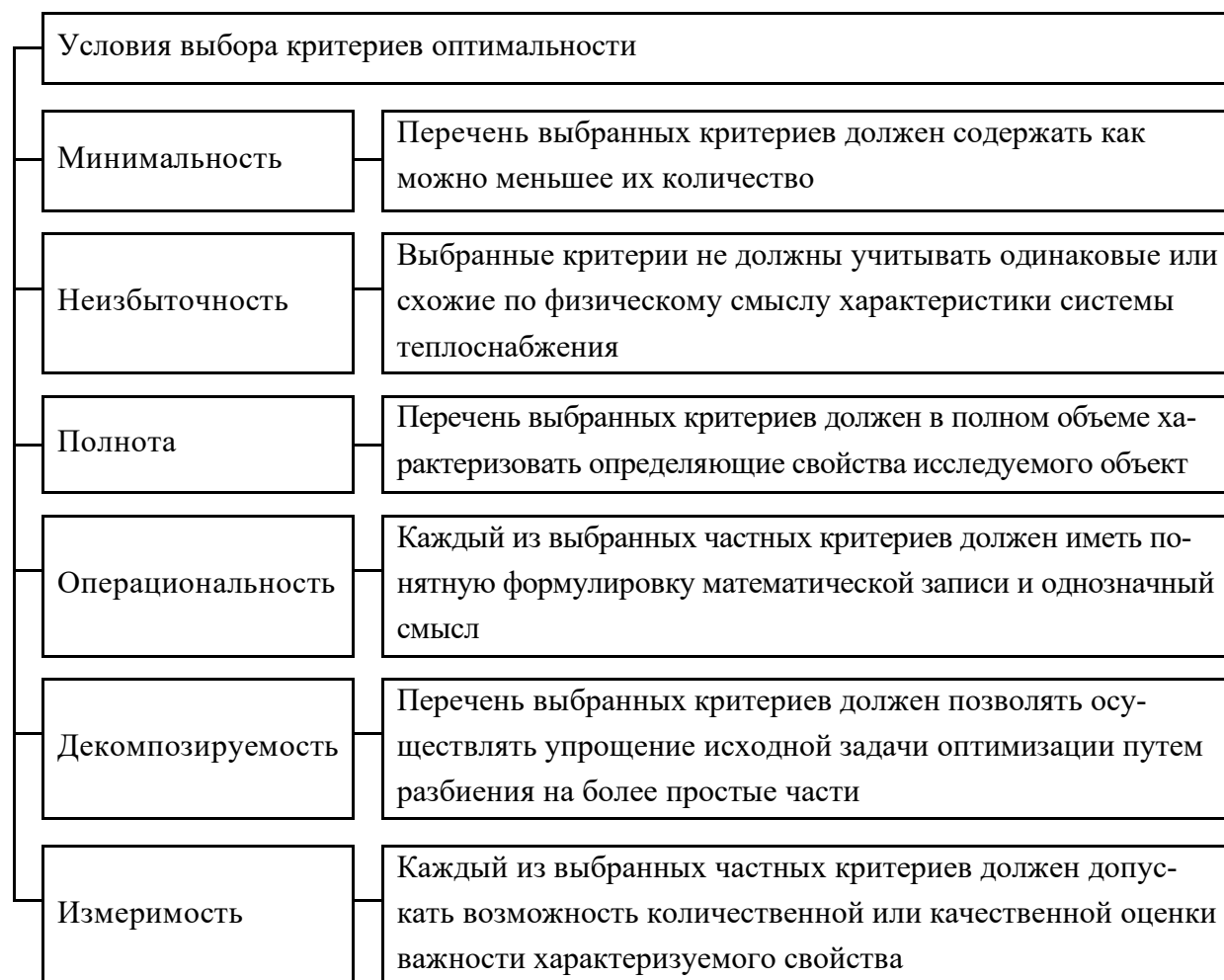


Рис. 1. Требуемые условия выбора частных критериев оптимальности

Fig. 1. Required conditions for selecting particular optimality criteria

Параметром, отражающим санитарно-эпидемиологическую безопасность, может служить эффективность удаления загрязняющих веществ, определяемая по формуле

$$\varepsilon = \frac{c_{\text{в}} - c_{\text{пр}}}{c_{\text{оз}} - c_{\text{пр}}}, \quad (18)$$

где $c_{\text{в}}$ – концентрация загрязняющего вещества в вытяжном воздухе; $c_{\text{пр}}$ – концентрация загрязняющего вещества в приточном воздухе; $c_{\text{оз}}$ – концентрация загрязняющего вещества в воздухе обслуживаемой зоны.

Эффективность воздухообмена зависит от схемы организации воздухообмена и характеризует связь между параметрами удаляемого воздуха и воздуха в обслуживаемой зоне. Например для подачи воздуха из верхней зоны помещения коэффициент эффективности может быть определен по уравнению

$$k_{\text{эф}} = \frac{Q_{\text{оз}} + Q_{\text{вз}}}{Q_{\text{оз}} \left(\alpha - \frac{L_0}{L_{\text{сп}}} \frac{F_{\text{сп}}}{F_{\text{п}}} \right) + Q_{\text{вз}} \frac{\alpha L_{\text{сп}} - L_0}{L_{\text{сп}} - L_{\text{м}}}}, \quad (19)$$

где $Q_{\text{оз}}$ – выделение теплоты в обслуживаемой зоне помещения; $Q_{\text{вз}}$ – выде-

ление теплоты в верхней зоне помещения; L_0 – расход приточного воздуха; $L_{стр}$ – расход воздуха в струе; L_m – расход воздуха местными системами вентиляции; $F_{стр}$ – расчетное сечение струи; F_n – расчетное сечение помещения на одну струю.

Для первых трех параметров оптимизируемая функция минимизируется, в отличие от коэффициента эффективности. Чем он выше, тем меньше приточного воздуха необходимо подавать в помещение для ассимиляции теплоизбытков, что свидетельствует о большей эффективности схемы воздухораспределения. Таким образом, при решении оптимизационной задачи представляется удобным привести все критерии к единообразию, например к поиску минимума. Тогда, в качестве критерия оптимальности допустимо рассматривать обратную к ней величину $k_{эф}^{об} = 1/k_{эф}$.

Результаты и их обсуждение

Поскольку в рассматриваемой задаче оптимизации имеют существенное значение абсолютные величины критериев при выбранном векторе параметров необходимо выбрать именно аддитивный метод свертывания обобщенного критерия. Он же получил наибольшее распространение для рассматриваемого типа оптимизационной задачи.

Поскольку значения параметров K , Δ , $k_{эф}$ и ε значительно отличаются (например капитальные затраты могут достигать сотен тысяч или миллионов, а коэффициент эффективности воздухо-

обмена – единиц), необходимо проводить их нормирование, которое представляет собой поиск отношения частного критерия оптимальности к некоторой нормирующей величине. В качестве нормирующего делителя предлагается применять так называемое директивное значение частных критериев, которое задается экспертом. Тогда преобразованный частный критерий оптимальности будет определяться по формуле

$$\psi_i(x) = \frac{\Psi_i(x)}{\Psi_i^{норм}(x)}, \quad (20)$$

где $\Psi_i(x)$ – частный критерий оптимальности до нормирования; $\Psi_i^{норм}(x)$ – i -й нормируемый делитель; $\psi_i(x)$ – нормированное значение частного критерия оптимальности.

Совместное решение уравнений (15) и (20) позволяет получить модель аддитивного критерия оптимальности выбора проектного решения систем обеспечения микроклимата, который запишется в виде

$$S = \chi_K \left(\frac{K_i(x)}{K_i^{норм}(x)} \right) + \chi_{\Delta} \left(\frac{\Delta_i(x)}{\Delta_i^{норм}(x)} \right) + \chi_{k_{эф}} \left(\frac{k_{эф}^{об}(x)}{k_{эф}^{об,норм}(x)} \right) + \chi_{\varepsilon} \left(\varepsilon \frac{\varepsilon_i(x)}{K_i^{норм}(x)} \right) \rightarrow \min, \quad (21)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ – рассматриваемые варианты проектного решения.

Выводы

Предложенная математическая модель выбора оптимального проектного решения систем обеспечения микроклимата, основывающаяся на методике свертывания аддитивного векторного критерия, отличается от существующих возможностью учета качественных и количественных характеристик рассматрива-

емого объекта, что позволяет повысить точность решения рассматриваемой многокритериальной оптимизационной задачи. Вводится уточнение, позволяющее привести частные критерии оптимальности к единообразию при поиске экстремума оптимизируемой аддитивной функции путем рассмотрения обратной величины коэффициента эффективности воздухообмена.

Список литературы

1. 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. Т. 32. № 2. С. 139-146.
2. 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). С. 17-28.
3. Сошин Р.О., Ткаченко Н.В. Анализ обследования систем обеспечения микроклимата ледовой арены "Ерофей" // *Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ*. 2017. №3. С. 357-360.
4. Почекунин П.С. Особенности создания параметров микроклимата во влажных помещениях с пониженной температурой // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2022. №1(50). С. 65-72.
5. Русаков С.В. Оценка влияния влажности воздуха на качество микроклимата в зале ледового катка и на состояние ледовой поверхности // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование*. 2015. № 2. С. 92-101.
6. Руководство ИИХФ по ледовым аренам. М.: Из-во ИИХФ, 2016. 104 с.
7. Батищев Д.И., Шапошников Д. Е. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений. Н.Новгород: ИПФ РАН, 1994. 92 с.
8. Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.
9. Чуйкин С.В., Колосов А.И. Многокритериальный анализ экологической безопасности объектов строительства // *Экология и промышленность России*. 2020. №3(24). С. 54-57.
10. Блюмин С.Л., Шуйкова И.А. Модели и методы принятия решений в условиях неопределенности. Липецк: ЛЭГИ, 2001. 138 с.

11. Гитис Л.Х. Статистическая классификация и кластерный анализ. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2003. 157 с.
12. Чуйкина А.А. Разработка методики определения наилучшего варианта трассы тепловой сети на начальном этапе проектирования // Научный журнал строительства и архитектуры. 2021. №3(63). С. 57-64.
13. Гвишиани Д.М., Емельянова С.В. Многокритериальные задачи принятия решений. М.: Машиностроение, 1978. 191 с.
14. Муромцев Д.Ю., Шамкин В.Н. Методы оптимизации и принятие проектных решений. Тамбов: Изд-во «ТГТУ», 2015. 80 с.
15. Ногин В.Д. Линейная свертка в многокритериальной оптимизации // Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. №4. С. 73-82.
16. Романова И.К. Об одном подходе к определению весовых коэффициентов метода пространства состояний // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. №4. С. 105-129.
17. Тимофеев М.В. Математическое моделирование процессов в технологии машиностроения. Рыбинск: РГАТУ имени П.А. Соловьёва, 2015. 155 с.
18. Fourer R., Gay D., Kernighan B., AMPL, A Modeling Language for Mathematical Programming, Second Edition. Belmont: Duxbury Press, 2003. 517 p.
19. J. Nocedal and S. J. Wright. Numerical Optimization. Springer New York, Second edition, 2006.
20. Mark Schmidt, Nicolas L Roux, Francis R Bach. Convergence rates of inexact proximalgradient methods for convex optimization // In Advances in neural information processing systems, pages 1458-1466, 2011.

References

1. 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, no. 322, pp.139-146.
2. 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, no.3(19), pp. 17-28.
3. Soshin R.O., Tkachenko N.V. [Analysis of the survey of microclimate systems of the Yerofey Ice Arena]. *Novye idei novogo veka: materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii FAD TOGU* [New ideas of the new century: materials of the international scientific conference FAD TOGU], 2017, no.3, pp. 357-360 (In Russ.).
4. Pohekunin P.S. [Features of creating microclimate parameters in humid rooms with low temperature]. *Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta* =

Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University. 2022, no.1(50), pp. 65-72 (In Russ.).

5. Rusakov S.V. [Assessment of the influence of air humidity on the quality of the microclimate in the hall of the ice rink and on the condition of the ice surface]. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya: Holodil'naya tekhnika i kondicionirovanie* = *Scientific journal of NIU ITMO. Series: Refrigeration and air conditioning*, 2015, no.2, pp. 92-101 (In Russ.).

6. IIHF Guide to Ice arenas. Moscow, IIHF Publishing House, 2016, 104 p.

7. Batishchev D.I., SHaposhnikov D. E. *Mnogokriterial'nyy vybor s chetom individual'nyh predpochtenij* [Multi-criteria selection taking into account individual preferences]. N. Novgorod, 1994, 92 p.

8. Batishchev D.I. *Metody optimal'nogo proektirovaniya* [Methods of optimal design]. Moscow, 1984, 248 p.

9. Chujkin S.V., Kolosov A.I. [Multicriteria analysis of environmental safety of construction objects]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* = *Ecology and industry of Russia*, 2020, no.3(24), pp. 54-57 (In Russ.).

10. Gvishiani D.M., Emel'yanova S.V. *Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya reshenij* [Multi-criteria decision-making tasks]. Moscow, 1978, 191 p.

11. Gitis L.H. *Statisticheskaya klassifikatsiya i klasternyy analiz* [Statistical classification and cluster analysis]. Moscow, 2003. 157 p.

12. Chujkina A.A. [Development of a methodology for determining the best option for the route of the thermal network at the initial stage of design]. *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arhitektury* = *Scientific Journal of Construction and Architecture*, 2021, no. 3(63), pp. 57-64 (In Russ.).

13. Gvishiani D.M., Emel'yanova S.V. *Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya reshenij*. [Multi-criteria decision-making tasks]. Moscow, 1978, 191 p.

14. Muromcev D.YU., SHamkin V.N. *Metody optimizatsii i prinyatie proektnykh reshenij*. [Optimization methods and project decision-making]. Tambov, 2015. 80 p.

15. Nogin V.D. [Linear convolution in multi-criteria optimization]. *Linejnaya svertka v mnogokriterial'noj optimizatsii. Iskusstvennyy intellekt i prinyatie reshenij* = *Artificial intelligence and decision-making*. 2014, no.4, pp. 73-82 (In Russ.).

16. Romanova I.K. [On one approach to determining the weighting coefficients of the state space method]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana* = *Science and Education: scientific publication of the Bauman Moscow State Technical University*. 2015, no. 4, pp. 105-129 (In Russ.).

17. Timofeev M.V. *Matematicheskoe modelirovanie processov v tekhnologii mashinostroeniya* [Mathematical modeling of processes in mechanical engineering technology]. Rybinsk, 2015, 155 p.

18. Fourer R., Gay D., Kernighan B., *AMPL, A Modeling Language for Mathematical Programming, Second Edition*. Belmont: Duxbury Press, 2003, 517 p.
19. Nocedal J., Wright S. J.. *Numerical Optimization*. Springer New York, Second edition, 2006.
20. Mark Schmidt, Nicolas L Roux, Francis R Bach. Convergence rates of inexact proximal gradient methods for convex optimization. *In Advances in neural information processing systems*, 2011, pp. 1458-1466.

Информация об авторах / Information about the Authors

Чуйкин Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: ser.chu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6040-323X>, ResearcherID: R-3144-2016

Sergey V. Chuykin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Structural Mechanics Department, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: ser.chu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6040-323X>, ResearcherID: R-3144-2016

Куцыгина Ольга Александровна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: olga.kutsigina@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2296-3583>,

Olga A. Kutsygina, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business Department, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: olga.kutsigina@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2296-3583>