

УДК 699.87

© А. В. Цыганков, д-р техн. наук, профессор
(НИУ ИТМО, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: tsygaav@hotmail.com

© В. А. Пухкал, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: pva1111@rambler.ru

© Т. А. Быханова, аспирант

© А. В. Литвиненко, магистрант
(НИУ ИТМО, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: kolesnikova_12@mail.ru, AndreyLit8@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-4-88-96

© А. В. Tsygankov, Dr. Sci. Tech., Professor
(ITMO University, St. Petersburg, Russia)

E-mail: tsygaav@hotmail.com

© V. A. Pukhkal, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: pva1111@rambler.ru

© T. A. Bykhanova, post-graduate student

© A. V. Litvinenko, undergraduate
(ITMO University, St. Petersburg, Russia)

E-mail: kolesnikova_12@mail.ru, AndreyLit8@gmail.com

МЕТОДИКА ВЫБОРА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК

METHODOLOGY FOR SELECTING THERMAL INSULATION MATERIALS BASED ON EXPERT EVALUATION

Изложены методика и алгоритм решения задачи оптимизации выбора теплоизоляционного материала. В качестве решения многокритериальной оптимизационной задачи предлагается рассматривать ранжированное множество альтернативных материалов. Для перехода к скалярной целевой функции использована аддитивная функция с весовыми коэффициентами локальных критериев. Весовые коэффициенты вычислялись методом парного сравнения критериев на основе плавающего предпочтения. Рассмотренная методика направлена на выбор материала тепловой изоляции на начальных этапах проектирования и может быть использована в системах поддержки принятия решений при проектировании энергоэффективных зданий и сооружений.

Ключевые слова: теплоизоляционные материалы, подбор теплоизоляции, многопараметрическая оптимизация, экспертная оценка.

The article presents a methodology and algorithm for solving the optimization problem of selecting a thermal insulation material. It is proposed to consider a ranked set of alternative materials as a solution to the multi-criteria optimization problem. To move to a scalar objective function, an additive function with weight coefficients of local criteria is used. The weight coefficients were calculated by paired comparison of criteria based on floating preference. The considered methodology is aimed at selecting a thermal insulation material at the initial stages of design and can be used in decision support systems for designing energy-efficient buildings and structures.

Keywords: thermal insulation materials, selection of thermal insulation, multi-parameter optimization, expert evaluation.

Введение

В настоящее время используется большое количество как традиционных, так и новых теплоизоляционных материалов. Их технические, теплофизические характеристики, требования к устройству и эксплуатации приведены в нормативных документах, таких как ГОСТ 16381¹, СП 50.13330²,

¹ ГОСТ 16381–2022. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Классификация. Общие технические требования. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 11 с.

² СП 50.13330.2024. Тепловая защита зданий. М.: Российский институт стандартизации, 2024. 70 с.

СП 71.13330³, ГОСТ 31913⁴, ГОСТ EN 12091⁵, ГОСТ Р 71023⁶, а также в технической документации производителей.

³ СП 71.13330.2017. Изоляционные и отделочные покрытия. М.: Минстрой России, 2017. 77 с.

⁴ ГОСТ 31913–2022. Материалы и изделия теплоизоляционные. Термины и определения. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 24 с.

⁵ ГОСТ EN 12091–2015. Материалы строительные теплоизоляционные. Определение характеристик при попеременном замораживании и оттаивании. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 8 с.

⁶ ГОСТ Р 71023–2023. Изделия теплоизоляционные древесноволокнистые, применяемые в строительстве. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 27 с.

В РФ наиболее востребованным теплоизоляционным материалом является минеральная вата. Следующие места по востребованности занимают изделия из пенополистирола и стекловаты [1]. В малоэтажном строительстве широкое распространение нашли газобетонные блоки без дополнительной тепловой изоляции [2]. При высоких экологических требованиях используются материалы на базе природных и искусственных жидких стекол [3].

Анализ инновационных теплоизоляционных материалов и конструкций [4–6] показывает, что такие материалы, как аэрогель [7–8], полиуретановая пена [9], пенополиизоцианурат (PIR) [10, 11] отличаются повышенными теплотехническими характеристиками [7–8], но являются более дорогими и требуют дополнительного обоснования их применения в различных условиях эксплуатации [6].

Чаще всего теплоизоляционный материал выбирают, рассчитывая сопротивление теплопередаче по приложению Г СП 50.13330.2024². Затем материалы попарно сравниваются по нескольким параметрам и ранжируются по приоритетности [12, 13].

Особенностью проектирования теплоизоляции является необходимость учета совокупности теплотехнических, экономических, экологических, прочностных, пожарно-технических и прочих характеристик. Значимость тех или иных характеристик зависит от большого числа требований, которые определяются климатом, назначением помещений, условиями эксплуатации, технологией строительства и т. д. Очевидно, что оценки значимости для одного объекта у экспертов различных специальностей будут существенно отличаться.

Таким образом, возникает задача многопараметрического оптимального выбора материала тепловой изоляции на основании экспертных оценок значимости локальных критериев.

Многообразие теплоизоляционных материалов и их локальных критериев приводит к тому, что альтернативные варианты представляют собой множество Парето. Анализ методов решения задачи многокритериальной оптимизации на множестве Парето показывает, что для рассматриваемой задачи эффективен метод парного сравнения критериев на основе плавающего предпочтения, который позволяет оценить согласованность экспертных оценок [14–16].

Методы

Физические, теплотехнические, экологические, экономические и эксплуатационные параметры — это числовые или вербальные переменные, служащие локальными критериями оптимизации. Их набор и важность при выборе утеплителя зависят от конкретного объекта.

Исходные данные оптимизационной задачи представляют собой матрицу:

$$\{A_{i,j}\} \quad i \in (1, n), j \in (1, p), \quad (1)$$

где n — количество альтернативных вариантов (строки); p — количество частных (локальных) критериев (столбцы).

Формулировка задачи в общем виде представлена в [17]:

$$\text{extr}F(\{X\}) = X^*; \quad (2)$$

$$\{X\} \in \{D_X\}; \quad (3)$$

$$F(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X)), \quad (4)$$

где X^* — оптимальное решение (результат решения оптимизационной задачи); $\{X\}$ — множество решений, находящихся в области Парето; $\{D_X\}$ — исходное множество решений; $F(X)$ — векторный критерий оптимальности; $f_j(X), j \in (1, p)$ — частные (скалярные) критерии оптимальности.

Результатом оптимизации по Парето является ранжированная последовательность, отражающая отношение Парето-доминирования на рассматриваемом множестве альтернатив [18].

Построение ранжированной последовательности предполагает переход от много-

параметрической задачи (1)–(4) к однопараметрической скалярной оптимизации. Для свертки вектора локальных критериев используется аддитивная целевая функция

$$\bar{Y}(X_j) = \sum_{i=1}^n \pm a_i \bar{f}_i(X_j), i \in [1, n], j \in [1, m], \quad (5)$$

где $\bar{Y}(X_j)$ — безразмерная скалярная целевая функция; $\bar{f}_i(X_j)$ — безразмерный частный критерий; a_i — коэффициент значимости (весовой коэффициент) локального критерия.

Для совокупности весовых коэффициентов должны выполняться условия: $a_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^n \pm a_i = 1, i \in [1, n]$.

Удобным вариантом нормирования является диапазон [0–1]. В качестве нормы используется относительное отклонение критериев от минимальных значений

$$\bar{f}_i(X) = \frac{f_i(X) - \min f_i(X)}{\max f_i(X) - \min f_i(X)}, i \in [1, n]. \quad (6)$$

Выбор знака слагаемых целевой функции определяется выбором типа экстремума. При поиске максимального значения целевой функции критерии, значение которых следует увеличивать, входят со знаком плюс, а критерии, значение которых необходимо уменьшать, — со знаком минус.

Согласно методу парного сравнения критериев на основе плавающего предпочтения, сначала формируются логические суждения экспертов о качественном уровне предпочтения критериев по отношению друг к другу. После этого, используя вербально-числовую шкалу (табл. 1), качественные (вербальные) предпочтения переводятся в количественные и составляется матрица парных сравнений [17, 19].

Сравнение всегда производится для характеристики материала, стоящей в левом столбце, по отношению к характеристике, стоящей в верхней строке.

Пусть C_1, C_2, \dots, C_n — совокупность характеристик материала. Количественные суждения о парах характеристик (C_i, C_j) представляются матрицей размера $n \times n$:

$$A = (a_{i,j}), (i, j = 1, 2 \dots n).$$

Таким образом, матрица парных сравнений представляет собой квадратную обратную-симметричную матрицу:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{1,2} & a_{1,n} \\ \frac{1}{a_{1,2}} & 1 & a_{2,n} \\ \frac{1}{a_{1,n}} & \frac{1}{a_{2,n}} & 1 \end{pmatrix}.$$

Поскольку матрица формируется на основе независимых экспертных оценок, она практически всегда оказывается несогласованной. Тем не менее, метод допускает наличие некоторой несогласованности [19].

После формирования матрицы A задача сводится к тому, чтобы поставить в соответствие C_1, C_2, \dots, C_n числовые коэффициенты $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, которые соответствуют принятым вербальным критериям важности.

Для положительной обратно симметричной матрицы предложен численный метод, согласно которому элементы собственного вектора матрицы вычисляются последовательно по формуле [19]

$$\omega_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{i,j}}, \quad (7)$$

а затем нормализуются:

$$a_i = \frac{\omega_i}{\sum_i \omega_i}. \quad (8)$$

Собственные значения определяются из матричного уравнения

$$[A]\bar{\omega} = \lambda \bar{\omega}. \quad (9)$$

Для согласованной обратно-симметричной матрицы $\lambda_{\max} = n$ [20], поэтому для оценки согласованности матрицы принят коэффициент

$$C_s = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)}. \quad (10)$$

Если $C_s \leq 0,1$, можно полагать, что матрица суждений согласована на приемлемом уровне [19].

Результаты

Вычисление весовых коэффициентов

В табл. 2 представлена матрица парных сравнений локальных критериев, предло-

Таблица 1

Вербально-числовая шкала относительной предпочтительности критериев

| Количественное определение уровня предпочтительности | Вербальное определение важности критерия |
|--|--|
| 1 | Равная предпочтительность |
| 3 | Умеренное превосходство |
| 5 | Сильное превосходство |
| 7 | Очень сильная предпочтительность |
| 9 | Абсолютная предпочтительность |
| 2, 4, 6, 8 | Промежуточный выбор между двумя соседними значениями |

женная группой экспертов Образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» ИТМО.

Собственный вектор матрицы парных сравнений A вычислялся по формулам (7)–(8):

$$a_i = 0,065 \cdot \begin{matrix} 0,294 \\ 0,207 \\ 0,137 \\ 0,140 \\ 0,058 \\ 0,042 \\ 0,031 \\ 0,026 \end{matrix}$$

Собственные числа матрицы и оценка ее согласованности по формулам (9)–(10):

$$\lambda = [9,38; 9,22; 9,18; 9,18; 9,38; 9,43; 9,24; 9,22; 9,23];$$

$$C_s = 0,054.$$

Так как $C_s < 0,1$ и $\sum_{i=1}^n a_i = 1$, то весовые коэффициенты локальных параметров согласованы на приемлемом уровне.

Вычислительный эксперимент

Рассмотрено семь вариантов теплоизоляционных материалов для типового коттеджа, расположенного в Санкт-Петербурге.

В табл. 3 приведены конкретные параметры рассматриваемых в вычислительном экс-

Таблица 2

Матрица парных сравнений локальных критериев

| Характеристика | Коэффициент теплопроводности | Стоимость | Удельная теплоемкость | Коэффициент температуропроводности | Горючесть | Плотность | Срок службы | Паропроницаемость | Экологичность |
|------------------------------------|------------------------------|-----------|-----------------------|------------------------------------|-----------|-----------|-------------|-------------------|---------------|
| Коэффициент теплопроводности | 1,00 | 2,00 | 3,00 | 3,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 7,00 | 7,00 |
| Стоимость | 0,50 | 1,00 | 2,00 | 2,00 | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 6,00 | 6,00 |
| Удельная теплоемкость | 0,33 | 0,50 | 1,00 | 1,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 5,00 | 5,00 |
| Коэффициент температуропроводности | 0,33 | 0,50 | 1,00 | 1,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 5,00 | 6,00 |
| Горючесть | 0,20 | 0,25 | 0,33 | 0,33 | 1,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 3,00 |
| Плотность | 0,20 | 0,25 | 0,33 | 0,33 | 0,50 | 1,00 | 2,00 | 3,00 | 3,00 |
| Срок службы | 0,20 | 0,25 | 0,33 | 0,33 | 0,50 | 0,50 | 1,00 | 1,00 | 2,00 |
| Паропроницаемость | 0,14 | 0,17 | 0,20 | 0,20 | 0,50 | 0,33 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Экологичность | 0,14 | 0,14 | 0,20 | 0,17 | 0,33 | 0,33 | 0,50 | 1,00 | 1,00 |

перименте материалов. Теплотехнические показатели приняты по приложению М СП 50.13330.2024². Методика испытания для определения класса горючести материалов приведена в ГОСТ Р 57270⁷.

Показатель экологичности — комплексный параметр, который учитывает возобновляемость исходного сырья, энергетические затраты на производство и утилизацию, токсичность в процессе эксплуатации и другие свойства. В общем случае оценка экологичности материала проводится на основании нормативных документов, например, ГОСТ Р ИСО 14040⁸. В табл. 3 приведены условные оценки экологичности, где $K = 1$ — полностью экологически безопасный материал, а $K = 0$ — неэкологичный материал.

Нормированные (см. формулу (6)) параметры теплоизоляционных материалов приведены в табл. 4.

⁷ ГОСТ Р 57270–2016. Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть. М.: Стандартинформ, 2016. 45 с.

⁸ ГОСТ Р ИСО 14040–2022. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 17 с.

Анализ показывает, что представленные альтернативные варианты соответствуют условиям Парето. То есть нет материала, который по всем параметрам превосходит остальные, и нет материала, который уступает всем остальным.

Как отмечалось выше, при оценке теплоизоляционных материалов некоторые характеристики являются позитивными при их увеличении, а некоторые — при их уменьшении. При нахождении максимума аддитивной целевой функции (5) со знаком плюс приняты: теплоемкость, срок службы, паропроницаемость, экологичность. Со знаком минус приняты: теплопроводность, стоимость, температуропроводность, плотность, горючесть.

Результаты вычисления целевой функции (5) для рассмотренных материалов показаны на рисунке и в табл. 5.

Полученный результат показывает значительное преимущество теплоизоляции из пеностекла над другими материалами. Таким образом, предлагаемая методика позволяет обосновать выбор теплоизоляционного

Таблица 3

Основные параметры альтернативных теплоизоляционных материалов

| № п/п | Материал / характеристика | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °С) | Стоимость, руб./м ² | Удельная теплоемкость, кДж/(кг · °С) | Коэффициент температуропроводности, м ² /с | Горючесть | Плотность, кг/м ³ | Срок службы, лет | Паропроницаемость, мг/(м · ч · Па) | Экологичность |
|-------|--|---|--------------------------------|--------------------------------------|---|-----------|------------------------------|------------------|------------------------------------|---------------|
| 1 | Минеральная каменная вата | 0,038 | 1110 | 0,84 | 6,50E-07 | 0 | 90 | 40 | 0,33 | 1 |
| 2 | Минеральная стеклянная вата | 0,04 | 400 | 0,84 | 2,20E-06 | 0 | 55 | 10 | 0,47 | 1 |
| 3 | Пенополистирол | 0,043 | 600 | 1,35 | 1,83E-06 | 4 | 22 | 35 | 0,05 | 0 |
| 4 | Вспененный пенополиуретан (пенополиуретан) | 0,035 | 500 | 1,47 | 4,13E-07 | 1,5 | 60 | 30 | 0,05 | 0 |
| 5 | Пеностекло | 0,06 | 3200 | 0,9 | 4,60E-07 | 0 | 180 | 65 | 0,005 | 1 |
| 6 | Пенобетон | 0,3 | 2500 | 0,84 | 3,16E-07 | 1 | 1000 | 65 | 0,163 | 1 |
| 7 | Пенополиизоцианурат (PIR) | 0,027 | 1500 | 1,47 | 5,10E-07 | 1,5 | 38 | 65 | 0,03 | 1 |

Безразмерные параметры теплоизоляционных материалов

| № п/п | Материал / характеристика | Коэффициент теплопроводности | Стоимость | Удельная теплоемкость | Коэффициент температуропроводности | Горючесть | Плотность | Срок службы | Паропроницаемость | Экологичность |
|-------|--|------------------------------|-----------|-----------------------|------------------------------------|-----------|-----------|-------------|-------------------|---------------|
| 1 | Минеральная каменная вата | 0,03 | 0,25 | 0,00 | 0,18 | 0,00 | 0,07 | 0,55 | 0,70 | 1,00 |
| 2 | Минеральная стеклянная вата | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 1,00 | 1,00 |
| 3 | Пенополистирол | 1,00 | 0,07 | 0,81 | 0,80 | 1,00 | 0,00 | 0,45 | 0,10 | 0,00 |
| 4 | Вспененный пенополиуретан (пенополиуретан) | 0,02 | 0,04 | 1,00 | 0,05 | 0,38 | 0,04 | 0,36 | 0,10 | 0,00 |
| 5 | Пеностекло | 0,08 | 1,00 | 0,10 | 0,08 | 0,00 | 0,16 | 1,00 | 0,00 | 1,00 |
| 6 | Пенобетон | 0,68 | 0,75 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | 1,00 | 1,00 | 0,34 | 1,00 |
| 7 | Пенополиизоцианурат (PIR) | 0,00 | 0,39 | 1,00 | 0,10 | 0,38 | 0,02 | 1,00 | 0,05 | 1,00 |

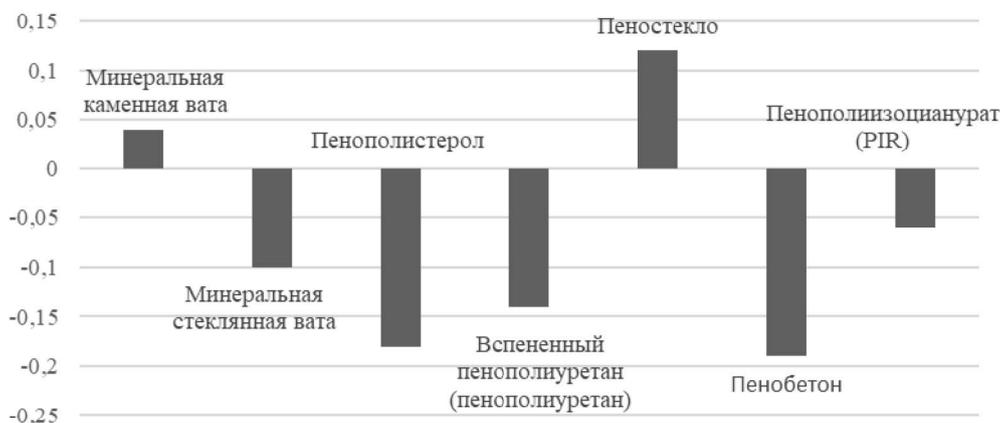
материала с учетом значимости отдельных параметров, определяющих его теплотехнические, экономические, экологические и другие характеристики.

Выводы

Рассмотренная методика выбора теплоизоляции базируется на экспертной оценке значимости разнотипных частных (локальных) показателей, характеризующих широкий спектр свойств альтернативных материалов. Принципиально важным является то, что метод парного сравнения

показателей на основе плавающего предпочтения позволяет оценить согласованность экспертных оценок и принять, отвергнуть или потребовать их уточнения. Переход от многопараметрической оптимизации к задаче поиска экстремума аддитивной целевой функции позволяет получить ранжированную последовательность альтернативных вариантов.

Если полученные результаты не определяют однозначно лучший вариант, то решение задачи повторяется для тех материалов,



Результат вычисления аддитивной целевой функции

Таблица 5

Ранжированная последовательность оценок теплоизоляционных материалов

| № | Материал | Оценка | Место |
|---|--|--------|-------|
| 1 | Минеральная каменная вата | 0,04 | 2 |
| 2 | Минеральная стеклянная вата | -0,10 | 4 |
| 3 | Пенополистирол | -0,18 | 6 |
| 4 | Вспененный пенополиуретан (пенополиуретан) | -0,14 | 5 |
| 5 | Пеностекло | 0,12 | 1 |
| 6 | Пенобетон | -0,19 | 7 |
| 7 | Пенополиизоцианурат (PIR) | -0,06 | 3 |

которые занимают наиболее высокие места в ранжированной последовательности.

Рассмотренный выше комплекс параметров теплоизоляционных материалов носит условный характер, он может быть существенно сокращен или дополнен акустическими, санитарно-гигиеническими, климатическими и другими характеристиками. Методика направлена на выбор материала тепловой изоляции и ни в коей мере не исключает дальнейших теплотехнических расчетов.

Библиографический список

1. Павлов М. В., Карнов Д. Ф., Березина В. П. Современные теплоизоляционные материалы для повышения теплозащитных свойств ограждающих конструкций зданий и энергоэффективности инженерных систем // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоснабжения. 2020. № 1. С. 81–87. EDN OKTXCK.
2. Korniyenko S. V., Vatin N. I., Gorshkov A. S. Thermophysical field testing of residential buildings made of autoclaved aerated concrete blocks // Magazine of Civil Engineering. 2016. Vol. 4 (64). Pp. 10–25. DOI 10.5862/MCE.64.2. EDN WWPEXN.
3. Мизюряев С. А., Жигулина А. Ю. Структурированный силикатнатриевый материал для теплоизоляции жилых зданий // Градостроительство. 2012. № 1 (17). С. 82–84. EDN TLUAIL.
4. Kumar D., Alam M., Zou P. X. W., Sanjayan J. G., Memon R. A. Comparative analysis of building insulation material properties and performance // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 131. 110038. DOI 10.1016/j.rser.2020.110038. EDN RSSMDQ.
5. Khayitov M. B. Thermal insulation materials: advantages and production // Theoretical & Applied Science. 2021. Vol. 1 (93). Pp. 375–378. DOI 10.15863/TAS.2021.01.93.65. EDN NLIAIH.
6. Якименко А. А., Плетнев Н. Е., Колечкин А. А. Улучшение теплоизоляции: разработка новых материалов и технологий для улучшения теплоизоляции зданий // Студенческие научные исследования: сб. ст. XVII Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 20 мая 2023 года. Пенза: Наука и Просвещение (ИИП Гуляев Г. Ю.), 2023. С. 56–59. EDN GYOCLE.
7. Li C., Chen Z., Dong W., Lin L. [et al.] A review of silicon-based aerogel thermal insulation materials: Performance optimization through composition and microstructure // Journal of Non-Crystalline Solids. 2021. Vol. 553. 120517. DOI 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120517. EDN OTTVKH.
8. Lamy-Mendes A., Pontinha A. D. R., Alves P., Santos P., Durães L. Progress in silica aerogel-containing materials for buildings' thermal insulation // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 286. 122815.
9. Ragab A. H. S., Attiah E. M. E., Shebl M. A., Nasser A. A. H. Comparative analysis of thermal performance for precast panel systems with conventional and innovative insulation materials // HBRC Journal. 2023. Vol. 19 (1). Pp. 427–452. DOI 10.1080/16874048.2023.2283294. EDN IIWIZM.
10. Гилев А. В. Анализ применения энергоэффективных пенополиизоцианурат (PIR) панелей, термопанелей SPANS, газоблоков D500 в архитектурных конструкциях зданий и сооружений // Научный диалог: Молодой ученый: сб. науч. тр. по материалам XXII Междунар. науч. конф. Санкт-Петербург, 22 декабря 2018 года. СПб.: ЦНТК МОАН, 2018. С. 57–59. DOI 10.18411/spc-22-12-2018-23. EDN VSGWLP.
11. Ватин Н. И., Султанов Ш. Т., Крупина А. А. Сравнение теплоизоляционных характеристик пенополиизоцианурата (PIR), минеральной ваты, карбона и аэрогеля // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2019. № 4 (138). С. 161–165. EDN VPSORD.
12. Горелик П. И., Золотова Ю. С. Современные теплоизоляционные материалы и особенности их применения // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 3 (18). С. 93–103. EDN SCPFFT.
13. Hung Anh Le Duong, Pásztor Z. An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 44. 102604. DOI 10.1016/j.job.2021.102604. EDN DBTSMU.
14. Ahmed N., Ali Y. H., Rashid T. A., Salih A. Unraveling the Versatility and Impact of Multi-Objective Optimization: Algorithms, Applications, and Trends for Solving

Complex Real-World Problems // Journal of Soft Computing and Computer Applications. 2024. Vol. 1 (1). 1008. DOI 10.70403/3008-1084.1008. EDN FHDZUE.

15. Li W., Zhang T., Wang R., Huang S., Liang J. Multimodal multi-objective optimization: Comparative study of the state-of-the-art // Swarm and Evolutionary Computation. 2023. Vol. 77. 101253. DOI 10.1016/j.swevo.2023.101253. EDN RHPIYI.

16. Постников В. М., Спиридонов С. Б. Методы выбора весовых коэффициентов локальных критериев // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2015. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-vybora-vesovykh-koeffitsientov-lokalnykh-kriteriev> (дата обращения: 02.02.2025).

17. Цыганков А. В., Долговская О. В., Виноградский Д. В. Структурная и параметрическая оптимизация канальной приточно-вытяжной вентиляции. Ч. 1 // Вестник Международной академии холода. 2024. № 4. С. 12–18. DOI 10.17586/1606-4313-2024-23-4-12-18. EDN ILXHSJ.

18. Есинов Б. А. Методы исследования операций. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Лань, 2022. 304 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/212204> (дата обращения: 22.11.2024). Режим доступа: для авториз. пользователей.

19. Саати Т. Л. Принятие решений: Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. М.: Радио и связь, 1993. 316 с.

20. Демидович Б. П., Марон И. А. Основы вычислительной математики. 8-е изд., стер. СПб.: Лань, 2022. 672 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/210674> (дата обращения: 02.02.2025).

References

1. Pavlov M. V., Karpov D. F., Berezina V. P. *Sovremennye teploizolyatsionnye materialy dlya povysheniya teplozashchitnykh svoystv ograzhdayushchikh konstruksiy zdaniy i energoeffektivnosti inzhenernykh sistem* [Modern thermal insulation materials to improve the heat-protective properties of building envelopes and energy efficiency of engineering systems]. *Nauchno-tekhnicheskie problemy sovershenstvovaniya i razvitiya sistem gazoenergосnabzheniya – Scientific and technical problems of improving and developing gas power supply systems*, 2020, no. 1, pp. 81–87.

2. Korniyenko S. V., Vatin N. I., Gorshkov A. S. Thermophysical field testing of residential buildings made of autoclaved aerated concrete blocks. *Magazine of Civil Engineering*, 2016, vol. 4 (64), pp. 10–25. DOI 10.5862/MCE.64.2.

3. Mizuryayev S. A., Zhigulina A. Yu. *Strukturirovanniy silikatnatrieviy material dlya teploizolyatsii zhilykh*

zdaniy [Structured sodium silicate material for thermal insulation of residential buildings]. *Gradostroitelstvo – Urban Planning*, 2012, no. 1 (17), pp. 82–84.

4. Kumar D., Alam M., Zou P. X. W., Sanjayan J. G., Memon R. A. Comparative analysis of building insulation material properties and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol. 131, 110038. DOI 10.1016/j.rser.2020.110038.

5. Khayitov M. B. Thermal insulation materials: advantages and production. *Theoretical & Applied Science*, 2021, vol. 1 (93), pp. 375–378. DOI 10.15863/TAS.2021.01.93.65.

6. Yakimenko A. A., Pletnev N. E., Kolechkin A. A. *Uluchshenie teploizolyatsii: razrabotka novykh materialov i tekhnologiy dlya uluchsheniya teploizolyatsii zdaniy* [Improvement of thermal insulation: development of new materials and technologies to improve the thermal insulation of buildings]. *Studencheskie nauchnye issledovaniya. Trudy XVII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Penza, 20 maya 2023 goda* [Student scientific research: Proceedings of the XVII International scientific-practical conf., Penza, May 20, 2023]. Penza, Nauka i Prosveshchenie Publ., 2023, pp. 56–59.

7. Li C., Chen Z., Dong W., Lin L., et al. A review of silicon-based aerogel thermal insulation materials: Performance optimization through composition and microstructure. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2021, vol. 553, 120517. DOI 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120517.

8. Lamy-Mendes A., Pontinha A. D. R., Alves P., Santos P., Durães L. Progress in silica aerogel-containing materials for buildings' thermal insulation. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 286, 122815.

9. Ragab A. H. S., Attiah E. M. E., Shebl M. A., Nasser A. A. H. Comparative analysis of thermal performance for precast panel systems with conventional and innovative insulation materials. *HBRC Journal*, 2023, vol. 19 (1), pp. 427–452. DOI 10.1080/16874048.2023.2283294.

10. Gilev A. V. *Analiz primeneniya energoeffektivnykh penopolizotsianurat (PIR) paneley, termopaneley SPANS, gazoblokov D500 v arkhitekturnykh konstruksiyakh zdaniy i sooruzheniy* [Analysis of the use of energy-efficient polyisocyanurate foam (PIR) panels, SPANS thermal panels, gas blocks D500 in architectural structures of buildings and structures]. *Nauchnyy dialog: Molodoy ucheniy. Trudy XXII mezhdunar. nauch. konf. Sankt-Peterburg, 22 dekabrya 2018 goda* [Scientific dialogue: Young scientist. Proceedings of the XXII international scientific conf. St. Petersburg, December 22, 2018]. St. Petersburg, TsNK MOAN Publ., 2018, pp. 57–59. DOI 10.18411/spc-22-12-2018-23.

11. Vatin N. I., Sultanov Sh. T., Krupina A. A. *Sravnienie teploizolyatsionnykh kharakteristik penopolizotsianurata*

(PIR), mineral'noy vaty, karbona i aerogelya [Comparison of the thermal insulation characteristics of polyisocyanurate foam (PIR), mineral wool, carbon and aerogel]. *Vestnik Donbasskoy natsional'noy akademii stroitel'stva i arkhitektury – Bulletin of Donbass National Academy of Construction and Architecture*, 2019, no. 4 (138), pp. 161–165.

12. Gorelik P. I., Zolotova Yu. S. *Sovremennye teploizolyatsionnye materialy i osobennosti ikh primeneniya* [Modern thermal insulation materials and features of their use]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy – Construction of unique buildings and structures*, 2014, no. 3 (18), pp. 93–103.

13. Hung Anh Le Duong, Pásztor Z. An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. *Journal of Building Engineering*, 2021, vol. 44, 102604. DOI 10.1016/j.job.2021.102604.

14. Ahmed N., Ali Y. H., Rashid T. A., Salih A. Unraveling the Versatility and Impact of Multi-Objective Optimization: Algorithms, Applications, and Trends for Solving Complex Real-World Problems. *Journal of Soft Computing and Computer Applications*, 2024, vol. 1 (1), 1008. DOI 10.70403/3008-1084.1008.

15. Li W., Zhang T., Wang R., Huang S., Liang J. Multimodal multi-objective optimization: Comparative study of the state-of-the-art. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2023, vol. 77, 101253. DOI 10.1016/j.swevo.2023.101253.

16. Postnikov V. M., Spiridonov S. B. *Metody vybora vesovykh koeffitsientov lokal'nykh kriteriev* [Methods for

choosing weight coefficients of local criteria]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N. E. Baumana – Science and Education. MSTU named after N.E. Bauman*, 2015, no. 6. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-vybora-vesovykh-koeffitsientov-lokalnykh-kriteriev> (accessed: 02.02.2025).

17. Tsygankov A. V., Dolgovskaya O. V., Vinogradskiy D. V. *Strukturnaya i parametricheskaya optimizatsiya kanal'noy pritochno-vytyazhnoy ventilyatsii. Ch. 1* [Structural and parametric optimization of channel supply and exhaust ventilation. Part 1]. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda – Bulletin of the International Academy of Cold*, 2024, no. 4, pp. 12–18. DOI 10.17586/1606-4313-2024-23-4-12-18.

18. Esipov B. A. *Metody issledovaniya operatsiy* [Methods for the study of operations]. 2-nd ed., revised. St. Petersburg, Lan' Publ., 2022, 304 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/212204> (accessed: 22.11.2024).

19. Saati T. L. *Prinyatie resheniy: Metod analiza ierarkhiy* [Decision-making: Method of analysis of hierarchies]. Transl. from English by Vachnadze R. G. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993, 316 p.

20. Demidovich B. P., Maron I. A. *Osnovy vychislitel'noy matematiki* [Fundamentals of computational mathematics]. 8-th ed., revised. St. Petersburg, Lan' Publ., 2022, 672 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/210674> (accessed: 02.02.2025).