

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ УТИЛИЗАТОРА ТЕПЛОТЫ С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКОГО ФАКТОРА

В. А. Никитина, А. Б. Сулин, С. С. Муравейников, Д. О. Дмитриев

Университет ИТМО,
Россия, 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, д. 9

Применение тепловых насосов в системах утилизации теплоты вытяжного воздуха является эффективной энергосберегающей технологией. В связи с увеличением количества хладагентов с различающимися характеристиками возникает проблема с принятием решения о применении конкретного вещества с учётом климатических особенностей конкретного региона. Методы многокритериальной оптимизации, адаптированные к решению данной задачи, могут быть использованы с учетом заданных предпочтений по энергетическому, экологическому и экономическому факторам. В работе применяется метод TOPSIS как один из подвидов метода многокритериальной оптимизации MADM, который адаптирован для решения поставленной задачи. Суть метода заключается в поиске Парето-оптимального альтернативного решения, наиболее приближенного к «идеально позитивному». Параметры теплонасосной установки рассчитаны в программе EES. Метод многокритериальной оптимизации TOPSIS реализован в виде вычислительной процедуры в среде Excel. В качестве альтернатив рассмотрены рабочие тела R410A, R407C, R290, R134a и R1234yf. Климатические зоны Российской Федерации представлены городами Санкт-Петербург, Петрозаводск, Сочи, Омск, Краснодар и Анадырь. Выбор оптимальной альтернативы выполнен с учетом предпочтений, заданных весовыми коэффициентами. Результаты многокритериальной оптимизации приведены в функции от климатического фактора градусо-сутки отопительного периода, что позволяет их использовать для любого населенного пункта. По результатам оптимизации выявлено, что при равной оценке значимости для шести городов Российской Федерации хладагент R1234yf имеет рейтинг выше остальных на 21 %–23 %. Оптимизация на основании энергетической эффективности выявила существенные преимущества у хладагентов R410A и R134a с разницей в 2 %–11 %. Для регионов с холодным климатом экономичней использовать хладагент R1234yf, в то время как для регионов с умеренным климатом наилучшим вариантом является R134a.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, тепловой насос, климатический фактор, рабочее тело, утилизация теплоты, TOPSIS, ГСОП.

Введение

Программа ООН по защите окружающей среды подсчитала, что здания выделяют до 30 % годовых выбросов парниковых газов (GHG) в мировом масштабе и потребляют до 40 % всей первичной энергии. Строительный сектор является крупнейшим потребителем первичной энергии по сравнению с другими крупными секторами, такими как промышленность и транспорт [1–3]. Многие страны располагают возможностью сокращения выбросов парниковых газов и снижения потребления энергии на 30 %. По этой причине стоит рассматривать в приоритете строительный сектор в местных, региональных и глобальных стратегиях снижения влияния на экологию. Повышение энергоэффективности зданий является одной из наиболее оптимальных мер по сокращению выбросов CO₂, особенно учитывая фактор низких энергетических показателей строительных сооружений [3, 4]. Большинство существующих зданий сложно заменить новыми в силу различных внешних факторов, поэтому модернизация старого фонда имеет большой потенциал для повышения энергоэффективности и сокращения CO₂ [5–7]. Для этих целей существуют меры по сокращению потребления энергии

и низкоуглеродные технологии. К ним относится создание защиты от инфильтрации через щели перекрытий, улучшение изоляции стен и замена остекления для минимизации притока тепла. Такие меры, как улучшение естественной вентиляции и дневного света, могут дополнительно снизить потребление энергии [6].

Тепловые насосы получают всё большее распространение и позволяют повышать энергетическую эффективность систем. Например, при встраивании теплового насоса в систему вентиляции теплота вытяжного воздуха рекуперирована для повторного использования на нагрев холодного приточного воздуха. В этом случае вытяжной воздух является низкопотенциальным источником, который можно использовать на протяжении всего отопительного периода. В одном из исследований снижения энергозатрат [8] рассматривались 12 зданий, в которых были введены мероприятия по энергосбережению. Вычисления показали, что даже с низким коэффициентом эффективности использование теплоутилизации сопоставимо с применением дополнительной теплоизоляции. С точки зрения энергетики, экономики и социальных аспектов, применение в зданиях различного назначения приточных систем вентиляции с встраиваемыми утилизаторами тепло-



Рис. 1. Подвиды многокритериального выбора решений
Fig. 1. Subtypes of multi-criteria decision making

ты приводит к сокращению до 60 % – 80 % расхода теплоты на системы кондиционирования, отопления и вентиляции воздуха [9]. Отмечается особая важность применения таких систем в малоэтажных зданиях, учитывая нестабильную естественную инфильтрацию через вытяжку [10, 11]. Модернизация существующих зданий при помощи энергоэффективных технологий является важным элементом экологической стратегии. Такой подход является комплексной задачей, наделённой множеством взаимосвязанных критериев. Вопреки этому, решения по-прежнему часто принимаются на основе одного критерия, например энергоэффективности или стоимости. Для решения этой проблемы, используются методы принятия решений по нескольким критериям к выбору энергоэффективных технологий для модернизации существующих зданий.

Учёт климатического фактора при расчёте различных инженерных систем играет ключевую роль в оценке их эффективности. Одно из исследований [12] в области применения оценки среднегодовой эффективности при проектировании систем жизнеобеспечения подтвердило целесообразность учёта климатических и экономических факторов при выборе параметров работы систем утилизации тепла на базе теплонасосного оборудования.

Рабочее тело в тепловом насосе играет важную роль при оценке показателей эффективности, поэтому подход к его подбору должен быть максимально обоснованным [13]. Однако разнообразие хладагентов, представленных на рынке, и количество параметров для сравнения усложняют выбор. Для корректного и обоснованного выбора оптимального решения в условиях конкурирующих факторов применяются методы многокритериальной оптимизации [14, 15]. В представленной работе рассматривается метод TOPSIS (Technique for Order Preference using Similarity to Ideal Solution — Методика предпочтения порядка по сходству с идеальным решением) — один из численных методов принятия оптимальных решений. Метод применяется в течение последних трех десятилетий [16, 17], и имеется множество работ по его применению [18–20]. Многокритериальный метод TOPSIS является одним из трёх подвидов оптимизации, которые относятся к многокритериальному выбору решения MADM (Multiple Attribute Decision Making) (рис. 1). Методы MADM могут разбить задачу принятия решений на несколько этапов, сравнить относитель-

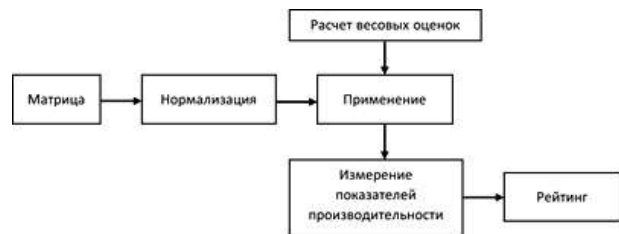


Рис. 2. Схема принятия оптимального решения
Fig. 2. Optimal Decision-Making Scheme

Таблица 1. Исходные данные
Table 1. Initial data

Критерий	C_1	...	C_k
Весовая оценка	w_1	...	w_k
A_1	x_{11}	...	x_{1k}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
A_p	x_{p1}	...	x_{pk}

ную важность критериев и выбрать оптимальную альтернативу с помощью строгих математических моделей. Эти методы могут прояснить взаимосвязи между критериями и минимизировать субъективность выбора [21]. Процесс принятия решений с использованием нескольких критериев характеризуется следующими фазами [22]:

- 1) идентификация цели;
- 2) разработка критериев;
- 3) генерация альтернатив, оценка и выбор;
- 4) реализация и мониторинг.

На рис. 2 приведена схема принятия оптимального решения с применением метода MADM.

Описание этапов метода многокритериальной оптимизации

В данном исследовании рассматривается применение метода многокритериальной оптимизации для обоснованного выбора рабочего тела теплового насоса с учетом климатического фактора.

На первом этапе создаётся матрица альтернатив (1), в которую входят все исходные данные, которые записываются в табл. 1. Здесь C — это критерии, а A — альтернативные варианты. При принятии решения критерии могут быть:

- техническими (например, требования к ёмкости);
- пространственными (надёжность и универсальность);
- экономическими (капитальные затраты, эксплуатационные расходы и расходы на техническое обслуживание);
- экологическими (сокращение выбросов CO_2 и потенциал энергосбережения);
- социальными (здоровье и безопасность жильцов).

$$D = \begin{pmatrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_k \\ A_1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{1k} \\ A_2 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_p & x_{p1} & x_{p2} & \dots & x_{pk} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

На следующем этапе значения факторов приводятся к нормированному виду. Нормирование матрицы выполняется по формуле (2).

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^k x_{ij}^2}} \quad i=1, 2, \dots, p \text{ и } i=1, 2, \dots, k, \quad (2)$$

где r_{ij} — нормированное значение; x_{ij} — исходное значение параметра.

Далее формируется матрица с учетом весовых оценок значимости каждого фактора в соответствии с экспертной оценкой.

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad i=1, 2, \dots, p \text{ и } i=1, 2, \dots, k, \quad (3)$$

где $V = [v_{ij}]p \cdot k$ — нормированная взвешенная матрица решений; w_j — весовая оценка фактора.

Здесь $\sum_{j=1}^k w_j = 1$.

В соответствии с методологией, предложенной Парето [23, 24], оптимальное решение находится максимально близко к идеально позитивному решению и максимально удаленно от идеально негативного решения.

Расчёт дистанции от максимально позитивного и максимально негативного решения выполняется в соответствии с выражениями (4) и (5) соответственно.

$$D^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_k^+\} \\ v_j^+ = [\max(v_{ij}), i \in I \text{ or } \min(v_{ij}), j \in J]. \quad (4)$$

$$D^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_k^-\} \\ v_j^- = [\min(v_{ij}), i \in I \text{ or } \max(v_{ij}), j \in J], \quad (5)$$

где J и I — негативные и позитивные характеристики соответственно.

Таким образом, данный метод оптимизации сводится к расчёту евклидовой метрики, то есть к определению дистанции от позитивно идеального решения D^+ и дистанции от негативно идеального решения D^- для каждой альтернативы A_i в соответствии с выражениями (6) и (7):

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^k (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad i=1, 2, \dots, p. \quad (6)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^k (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad i=1, 2, \dots, p. \quad (7)$$

Определение относительной близости к идеальному решению l_i выполняется в соответствии с выражением (8):

$$l_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad i=1, 2, \dots, p. \quad (8)$$

В итоге формируется рейтинг для альтернатив на основе относительной близости к идеально позитивному решению, на основании которого выбирается оптимальный вариант.

Применение метода к поставленной задаче

Для проведения оптимизации были подобраны 5 хладагентов, которые применяются в современных тепловых насосах, а именно R410A, R407C, R290, R134a и R1234yf. Для их сравнения были рассчитаны и подобраны по справочным данным следующие показатели утилизатора теплоты вытяжного воздуха на базе теплового насоса:

COP — коэффициент преобразования;

$\eta_{\text{экс}}$ — эксергетический КПД теплового насоса;

CO₂ — сокращение выбросов углекислого газа;

GWP — потенциал глобального потепления;

Горючесть — класс горючести;

ПЭ — удельные затраты первичной энергии на производство теплоты;

NPV — срок окупаемости.

Расчёт показателей утилизатора теплоты (рис. 3) проводился в программе EES по разработанному расчётному алгоритму, а результат компоновался в программе Excel, где подвергался дополнительным корректировкам (рис. 4). Методика расчета и результаты верификации приведены в [25, 26].

На основании расчётов параметров установки и выбранных факторов составлена таблица с исходными данными (табл. 2), которая использована как матрица решений в соответствии с (1).

Распределение оценок значимости было принято на основании того, что их сумма для каждой альтернативы должна быть равна 1. Учитывались следующие варианты предпочтений: энергетическая

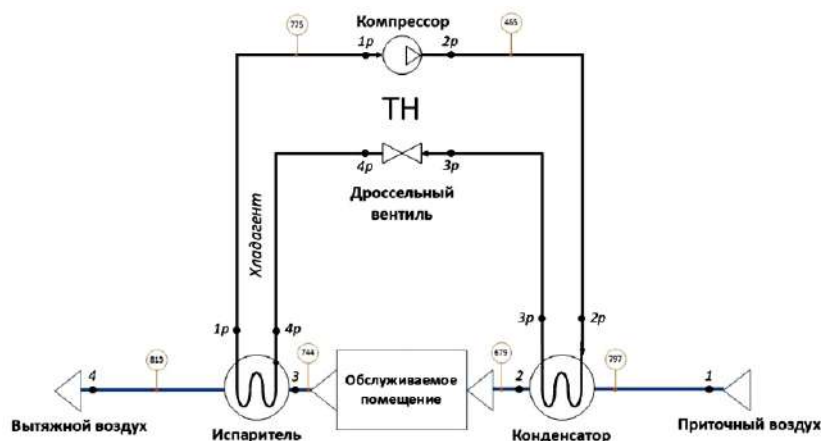


Рис. 3. Упрощённая схема системы вентиляции со встроенным тепловым насосом
Fig. 3. Simplified diagram of a ventilation system with a built-in heat pump

C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
		0,099	18,075	20,000	-0,114	22,000	3,573	3,564	3449,997	6,063
		Gka	QevapFull, kW	Qcond, kW	Tamb, C	Tairevap	Проверка Wcfull, kW	Wcfull, kW	Cdprod [gr]	COP
06.10.22 1:00	1	0,1002	17,41	20	6,2	22	4,799	4,799	4646	4,168
06.10.22 2:00	2	0,1001	17,44	20	5,9		4,741	4,741	4589	4,219
06.10.22 3:00	3	0,1001	17,46	20	5,7		4,702	4,702	4552	4,254
06.10.22 4:00	4	0,09998	17,51	20	5,2		4,606	4,606	4458	4,342
06.10.22 5:00	5	0,1	17,5	20	5,3		4,625	4,625	4477	4,324
06.10.22 6:00	6	0,1	17,5	20	5,3		4,625	4,625	4477	4,324
06.10.22 7:00	7	0,1	17,49	20	5,4		4,644	4,644	4496	4,307

Рис. 4. Фрагмент таблицы данных в программе Excel
Fig. 4. Fragment of a data table in Excel

Таблица 2. Исходные данные для климатических условий Санкт-Петербурга
Table 2. Initial data for the climatic conditions of Saint Petersburg

	COP	$\eta_{\text{экс}}$	CO ₂	GWP	Горючесть	ПЭ	NPV
R410A	5,86	0,28	83,87	2088,0	1,0	0,49	0,95
R407C	4,63	0,22	78,65	1774,0	1,0	0,63	1,0
R290	6,01	0,29	84,52	3,0	3,0	0,47	0,9
R134a	6,06	0,29	84,72	1430,0	1,0	0,47	0,8
R1234yf	6,02	0,29	84,54	4,0	2,0	0,47	0,95

Таблица 3. Оценки значимости
Table 3. Weights

Варианты предпочтений	COP	$\eta_{\text{экс}}$	CO ₂	GWP	Горючесть	ПЭ	NPV
Энергетическая эффективность	0,30	0,30	0,01	0,01	0,08	0,20	0,10
Экология	0,07	0,05	0,30	0,30	0,08	0,10	0,10
Экономичность	0,15	0,13	0,13	0,05	0,05	0,20	0,30
Равное предпочтение	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14

Таблица 4. Ранжирование рабочих тел для климата Санкт-Петербурга
Table 4. Ranking of working fluid for the climate of Saint Petersburg

Варианты предпочтений	R410A	R407C	R290	R134a	R1234yf
Энергетическая эффективность	0,84	0,43	0,55	0,94	0,72
Экология	0,18	0,22	0,83	0,36	0,91
Экономичность	0,50	0,32	0,63	0,70	0,67
Равное предпочтение	0,44	0,45	0,58	0,56	0,74

эффективность, экология, экономичность и равное предпочтение (табл. 3).

В результате применения метода многокритериальной оптимизации получены данные по ранжированию конкурирующих рабочих тел теплового насоса. В табл. 4 приведены результаты ранжирования для случая применения установки в климатических условиях Санкт-Петербурга.

Анализ результатов

В соответствии с описанной выше методикой многокритериальной оптимизации выполнены расчеты для ранжирования рабочих тел теплового насоса с учетом климатических условий городов Санкт-Петербург, Петрозаводск, Сочи, Омск, Крас-

нодар и Анадырь, отличающихся продолжительностью отопительного периода. В качестве показателя климатического фактора выбран параметр ГСОП (градусо-сутки отопительного периода) [27]. В соответствии с [28] этот показатель для выбранных городов имеет следующие значения: Санкт-Петербург — 4895,2; Петрозаводск — 5873,4; Сочи — 1432,2; Омск — 6501,6; Краснодар — 2817,8; Анадырь — 9830,7. Таким образом, выполненные расчеты справедливы для всего диапазона климатических условий Российской Федерации.

Примеры результатов ранжирования рабочих тел теплового насоса для климатических условий Санкт-Петербурга и Омска приведены на рис. 5 и 6.

По результатам оптимизации можно оценить, что самыми энергетически эффективными яв-

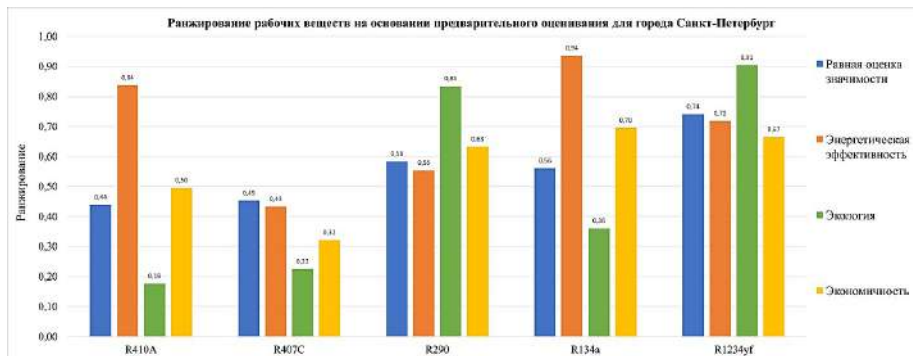


Рис. 5. Ранжирование рабочих тел для климата Санкт-Петербурга
Fig. 5. Ranking of working fluid for the climate of Saint Petersburg

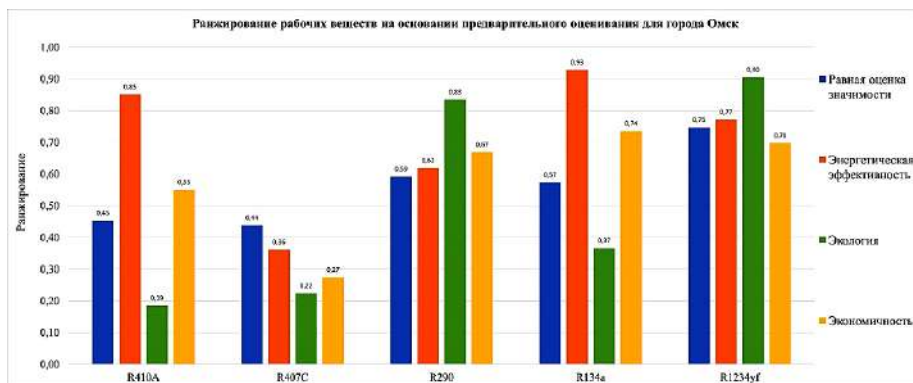


Рис. 6. Ранжирование рабочих тел для климата Омска
Fig. 6. Ranking of working fluid for the climate of Omsk

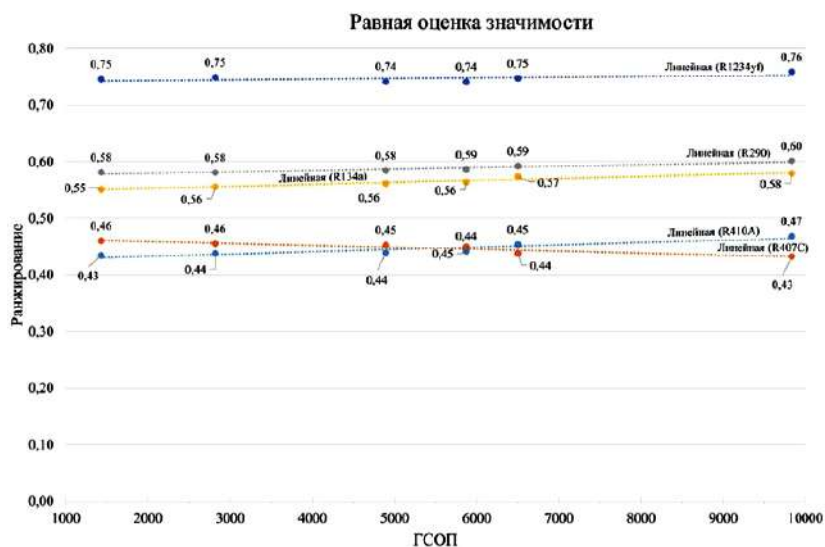


Рис. 7. Ранжирование рабочих тел в функции от ГСОП при равной оценке значимости
Fig. 7. Ranking of working fluid as a function of the HSDD with equal assessment of significance

ляются хладагенты R134a и R410A. По экологии лучшие результаты показали хладагенты R1234yf и R290. Наиболее экономичными являются установки на R134a и R1234yf. При равной оценке значимости наивысший рейтинг получил R1234yf. При расчёте среднего значения по всем направлениям оптимизации наивысший рейтинг получает хладагент R1234yf. Таким образом, он является оптимальным для использования в городах Санкт-Петербург и Омск.

На рис. 7–9 результаты ранжирования рабочих тел приведены в зависимости от ГСОП. Данное представление позволяет определить рейтинг рабочего тела для любого населенного пункта на основании данных о его климатическом факторе.

Результаты расчетов показывают, что при равном предпочтении по показателям наивысший рейтинг получает R1234yf во всех городах, которые попадают в представленный диапазон ГСОП (рис. 7). Хладагенты R1234yf, R290, R134a и R410A име-

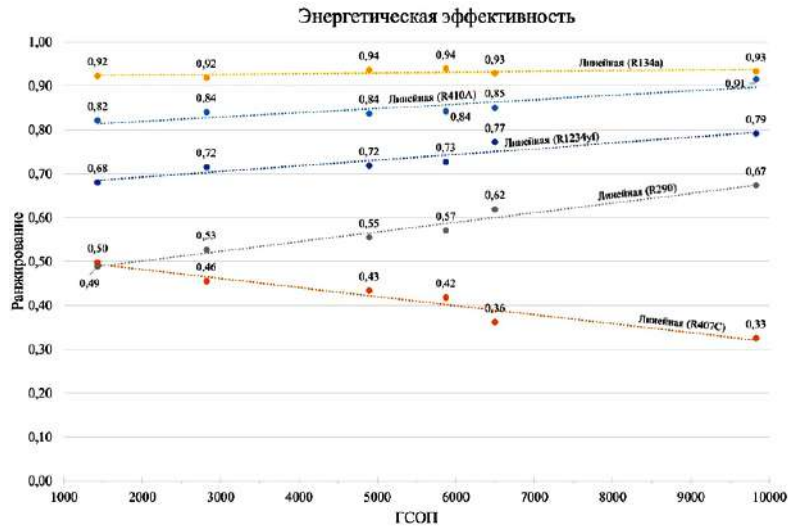


Рис. 8. Ранжирование рабочих тел в функции от ГСОП с позиций энергетической эффективности
 Fig. 8. Ranking of working fluids as a function of the HSDD from the standpoint of energy efficiency

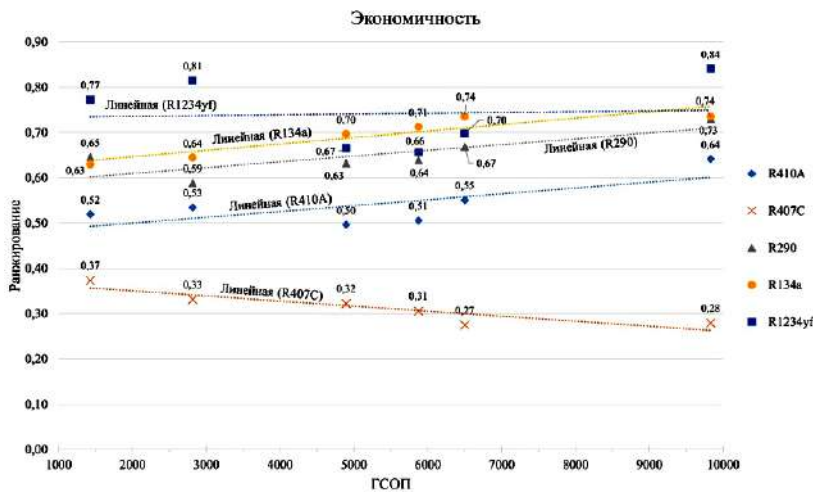


Рис. 9. Ранжирование рабочих тел в функции от ГСОП с позиций экономичности
 Fig. 9. Ranking of working fluids as a function of the HSDD from the standpoint of cost-effectiveness

ют линейно возрастающий рейтинг при увеличении ГСОП от 1000 до 10000, то есть их эффективность возрастает при понижающихся температурах. Разница составляет 2 %, 3 %, 5 % и 7 % соответственно. Рейтинг R407C, напротив, понижается на 6 %.

С позиций энергетической эффективности (рис. 8) хладагент R134a получает наивысший рейтинг во всём диапазоне ГСОП от 1000 до 10000. Наихудший рейтинг при данном приоритете показывает R407C, причем в рассмотренном диапазоне ГСОП его показатели снижаются на 53 %.

С позиций экономического приоритета для регионов с холодным климатом предпочтительно использовать хладагент R1234yf (рис. 9). Для городов со средними значениями ГСОП в диапазоне от 4500 до 7000 наилучшим вариантом является R134a.

Заключение

В представленной работе выполнена многокритериальная оптимизация хладагентов для теплово-

го насоса в составе установки утилизации теплоты вытяжного воздуха с учетом климатического фактора. По результатам оптимизации выявлено, что при равной оценке значимости для пяти городов Российской Федерации хладагент R1234yf имеет рейтинг выше остальных на 21 %–23 %. R410A больше подходит для городов с холодным климатом. Если сравнивать его рейтинг с хладагентом R407C, разница составляет 3 %–7 %. Оптимизация на основании энергетической эффективности выявила существенные преимущества у хладагентов R410A и R134a с разницей в 2 %–11 %. Их рейтинги достигают 0,91 и 0,94 соответственно. Самым неэкономичным в использовании является хладагент R407C с рейтингом 0,27 для города Омска. Оптимизация по предпочтению экономической эффективности выявила наивысший рейтинг для хладагента R134a для всех городов. Для регионов с холодным климатом этих регионов экономичней использовать хладагент R1234yf. Для городов со средним ГСОП от 4500 до 7000 наилучшим вариантом является R134a.

Результаты многокритериальной оптимизации, приведенные в функции от климатического фактора ГСОП, могут быть использованы для любого населенного пункта.

При наличии критериев и весовых коэффициентов можно оценить эффективность альтернатив. Информация может быть доступна в виде количественных или качественных данных. Нормализация количественных данных облегчает сравнение критериев с различными измерениями и распределением. Качественная информация должна быть преобразована в числовые значения с использованием определенных функций полезности.

Список источников

1. Pérez-Lombard L., Ortiz J., and Pout C. A review on buildings energy consumption information // *Energy and Buildings*. 2008. Vol. 40 (3). P. 394–398. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
2. Butler D. Architects of a low-energy future // *Nature*. 2008. Vol. 452 (3). P. 520–523. DOI: 10.1038/452520a.
3. Saidur R. Energy consumption, energy savings, and emission analysis in Malaysian office buildings // *Energy Policy*. 2009. Vol. 37 (10). P. 4104–4113.
4. Spyropoulos G. N., Balaras C. A. Energy consumption and the potential of energy savings in Hellenic office buildings used as bank branches — a case study // *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43 (4). P. 770–778. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.12.015.
5. Norris M., Shiels P. Regular national report on housing developments in European countries — synthesis report. Dublin: The Housing Unit, 2004.
6. Roberts S. Altering existing buildings in the UK // *Energy Policy*. 2008. Vol. 36 (12). P. 4482–4486. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.09.023.
7. Energy Efficiency Directive (2012/27/EU). URL: <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-directive>. (дата обращения: 12.04.2024).
8. Самарин О. Д. Энергетический баланс гражданских зданий и возможные направления энергосбережения // *Жилищное строительство*. 2012. № 8. С. 2–4. EDN: PEZFXR.
9. Кокорин О. Я. Современные системы кондиционирования. Москва: Изд-во физико-математической литературы. 2003. 272 с.
10. Наумов А. Л., Серов С. Ф., Будза А. О. Квартирные утилизаторы теплоты вытяжного воздуха // *АВОК*. 2012. № 1. URL: abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5155 (дата обращения: 28.11.2024).
11. Бродач М. М., Шилкин Н. В. Малоэтажные многоквартирные жилые здания как новая среда обитания // *Энергосбережение*. 2020. № 5. С. 4–6. EDN: TRHXQT.
12. Muraveinikov S. S., Sulin A., Baranov I., Nikitin A. Average annual efficiency evaluation in the design of life support systems // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2141 (1). 030019. DOI: 10.1063/1.5122069.
13. Tsvetkov O. B., Laptev Yu., Nikitin A. [et al.]. Energy and environment options of working fluid alternative for different refrigeration configurations // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 826 (1). 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/826/1/012017.
14. Handayani T., Harvey A., Dalton R. [et al.]. Selection of the Optimum Working Fluids in Organic Rankine Cycles Using TOPSIS // *Chemical Engineering Transaction*. 2012. Vol. 29. P. 139–144. DOI: 10.3303/CET1229024.
15. Deymi-Dashtebayaz M., Sulin A. B., Ryabova T., Sankina Yu. Energy, exergoeconomic and environmental optimization of a cascade refrigeration system using different low GWP refrigerants // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9. 106473. DOI: 10.1016/j.jece.2021.106473.
16. Hwang C. L., Yoon K. Methods for multiple attribute decision making // *Lecture Notes in Economics and*

Mathematical Systems. 1981. P. 58–191. DOI: 10.1007/978-3-642-48318-9_3.

17. Hwang C. L., Lai Y. J., Liu T. Y. A new approach for multiple objective decision making // *Computers & Operations Research*. 1993. Vol. 20, № 8. P. 889–899. DOI: 10.1016/0305-0548(93)90109-V.

18. Yoon K. P., Hwang C. L. Multiple attribute decision making: an introduction. Thousand Oaks, CA: Sage, 1995. 73 p. ISBN 0-8039-5486-7.

19. Tzeng G. H., Huang J. J. Multiple attribute decision making: methods and applications. CRC Press, 2011. 352 p. DOI: 10.1201/b11032.

20. Xu J., Tao Z. Rough multiple objective decision making. CRC Press, 2011. 446 p. DOI: 10.1201/b11061.

21. Linkov I., Moberg E. Multi-criteria Decision Analysis: Environmental Applications and Case Studies. CRC Press, 2012. 204 p. DOI: 10.1201/b11471.

22. Gore C., Murray K., Richardson B. Strategic Decision-making. USA: Cassell Press, 1992. 242 p.

23. Nasouri M., Nabi R., Amiri M. [et al.]. Performance-based Pareto optimization and multi-attribute decision making of an actual indirect-expansion solar-assisted heat pump system // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 42 (5). 103053. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.103053.

24. Nagar D., Ramu P., Deb K. Visualization and analysis of Pareto-optimal fronts using interpretable self-organizing map (iSOM) // *Swarm and Evolutionary Computation*. 2023. Vol. 76 (4). 101202. DOI: 10.1016/j.swevo.2022.101202.

25. Никитина В. А., Сулин А. Б., Муравейников С. С., Никитин А. А., Макатов К. Энергомоделирование и экспериментальная верификация режимов работы теплового насоса при утилизации теплоты вытяжного воздуха. Часть 1. Схемные решения и расчетная модель // *Вестник Международной академии холода*. 2023. № 4 (89). С. 3–10. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-3-10. EDN: GMEVFC.

26. Никитина В. А., Сулин А. Б., Муравейников С. С., Никитин А. А., Макатов К. Энергомоделирование и экспериментальная верификация режимов работы теплового насоса при утилизации теплоты вытяжного воздуха. Часть 2. Энергетические, экономические и экологические показатели // *Вестник Международной академии холода*. 2024. № 1 (90). С. 43–49. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-43-49. EDN: OJAWOM.

27. Ливчак В. И. Градусо-сутки отопительного периода как инструмент сравнения уровня энергоэффективности зданий в России и в других странах // *Энергосбережение*. 2015. № 6. С. 20–25.

28. Расчет ГСОП онлайн. URL: <https://lsk-lskos.ru/gso> (дата обращения: 11.12.2024).

НИКИТИНА Вероника Александровна, аспирант, ассистент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 2116-2812

AuthorID (РИНЦ): 1278704

ORCID: 0009-0002-9721-797X

AuthorID (SCOPUS): 57257097600

Адрес для переписки: vanikitina@itmo.ru

СУЛИН Александр Борисович, доктор технических наук, профессор образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 5540-5765

AuthorID (РИНЦ): 445299

ORCID: 0000-0002-4580-6070

AuthorID (SCOPUS): 6507491881

ResearcherID: W-4842-2017

Адрес для переписки: absulin@itmo.ru

МУРАВЕЙНИКОВ Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 5034-9521

AuthorID (РИНЦ): 1185073

ORCID: 0000-0001-7295-5904

AuthorID (SCOPUS): 57210976736

Адрес для переписки: ssmuraveinikov@itmo.ru

ДМИТРИЕВ Денис Олегович, аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, г. Санкт-Петербург.

Адрес для переписки: denisdmitriev2012@gmail.com

Для цитирования

Никитина В. А., Сулин А. Б., Муравейников С. С., Дмитриев Д. О. Многокритериальная оптимизация утилизатора теплоты с учетом климатического фактора // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 1. С.46 – 55. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-1-46-55. EDN: JLCGRP.

Статья поступила в редакцию 24.01.2025 г.

© В. А. Никитина, А. Б. Сулин,

С. С. Муравейников, Д. О. Дмитриев

MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF HEAT RECOVERY UNIT IN TERMS OF THE CLIMATIC FACTOR

V. A. Nikitina, A. B. Sulin, S. S. Muraveinikov, D. O. Dmitriev

ITMO University, Russia, Saint Petersburg, Lomonosov Str., 9, 191002

The use of heat pumps in exhaust air heat recovery systems is an effective energy-saving technology. Due to the increase in the number of refrigerants with different characteristics, a problem arises with making a decision on the use of a specific substance, taking into account the climatic features of a particular region. Multicriteria optimization methods adapted to solving this problem can be used taking into account the specified preferences for energy, environmental and economic factors. The TOPSIS method is used in this paper as one of the subtypes of the MADM multicriteria optimization method, which is adapted to solve the problem. The essence of the method is to find a Pareto-optimal alternative solution that is closest to the «ideal positive». The parameters of the heat pump unit are calculated in the EES program. The TOPSIS multicriteria optimization method is implemented as a computational procedure in the Excel environment. The working fluids R410A, R407C, R290, R134a and R1234yf are considered as alternatives. The climatic zones of the Russian Federation are represented by the cities of Saint Petersburg, Petrozavodsk, Sochi, Omsk, Krasnodar and Anadyr. The optimal alternative is selected taking into account the preferences specified by the weighting factors. The results of multicriteria optimization are presented as a function of the climatic factor of the HSDD, which allows them to be used for any locality. According to the optimization results, it is revealed that with an equal assessment of the significance for six cities of the Russian Federation, the refrigerant R1234yf has a rating higher than the others by 21 %–23 %. Optimization based on energy efficiency revealed significant advantages in refrigerants R410A and R134a with a difference of 2 %–11 %. For regions with a cold climate, it is more economical to use refrigerant R1234yf, while for regions with a moderate climate, the best option is R134a.

Keywords: multicriterial optimization, heat pump, climatic factor, working fluid, heat recovery, TOPSIS, HSDD.

References

1. Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout C. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*. 2008. Vol. 40 (3). P. 394–398. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007. (In Engl.).
2. Butler D. Architects of a low-energy future. *Nature*. 2008. Vol. 452 (3). P. 520–523. DOI: 10.1038/452520a. (In Engl.).
3. Saidur R. Energy consumption, energy savings, and emission analysis in Malaysian office buildings. *Energy Policy*. 2009. Vol. 37 (10). P. 4104–4113. (In Engl.).
4. Spyropoulos G. N., Balaras C. A. Energy consumption and the potential of energy savings in Hellenic office buildings used as bank branches — a case study. *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43 (4). P. 770–778. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.12.015. (In Engl.).
5. Norris M., Shiels P. Regular national report on housing developments in European countries — synthesis report. Dublin: The Housing Unit, 2004. (In Engl.).
6. Roberts S. Altering existing buildings in the UK. *Energy Policy*. 2008. Vol. 36 (12). P. 4482–4486. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.09.023. (In Engl.).
7. Energy Efficiency Directive (2012/27/EU). URL: <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-directive>. (accessed: 12.04.2024). (In Engl.).
8. Samarin O. D. Energeticheskiy balans grazhdanskikh zdaniy i vozmozhnyye napravleniya energosberezheniya [Energy balance of civil buildings and possible directions of energy saving]. Zhilishchnoye stroitel'stvo. *Housing Construction*. 2012. No. 8. P. 2–4. EDN: PEZFXR. (In Russ.).
9. Kokorin O. Ya. Sovremennyye sistemy konditsionirovaniya [Modern air conditioning systems]. Moscow, 2003. 272 p. (In Russ.).
10. Naumov A. L., Serov S. F., Budza A. O. Kvartirnyye utilizatory teploty vytyazhnogo vozdukha [Apartment exhaust air heat recovery units]. *ABOK*. 2012. No. 1. URL: abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5155 (accessed: 28.11.2024). (In Russ.).
11. Brodach M. M., Shilkin N. V. Maloetazhnyye mnogokvartirnyye zhilye zdaniya kak novaya sreda obitaniya [Low-rise multi-apartment residential buildings as a new living environment]. Energosberezheniye. *Energy Saving*. 2020. No. 5. P. 4–6. EDN: TPHXQT. (In Russ.).
12. Muraveinikov S. S., Sulin A., Baranov I., Nikitin A. Average annual efficiency evaluation in the design of life support systems. *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2141 (1). 030019. DOI: 10.1063/1.5122069. (In Engl.).
13. Tsvetkov O. B., Laptev Yu., Nikitin A. [et al.]. Energy and environment options of working fluid alternative for different refrigeration configurations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 826 (1). 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/826/1/012017. (In Engl.).
14. Handayani T., Harvey A., Dalton R. [et al.]. Selection of the Optimum Working Fluids in Organic Rankine Cycles Using TOPSIS. *Chemical Engineering Transaction*. 2012. Vol. 29. P. 139–144. DOI: 10.3303/CET1229024. (In Engl.).
15. Deymi-Dashtebayaz M., Sulin A. B., Ryabova T., Sankina Yu. Energy, exergoeconomic and environmental optimization of a cascade refrigeration system using different low GWP refrigerants. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9. 106473. DOI: 10.1016/j.jece.2021.106473. (In Engl.).

16. Hwang C. L., Yoon K. Methods for multiple attribute decision making. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. 1981. P. 58–191. DOI: 10.1007/978-3-642-48318-9_3. (In Engl.).
17. Hwang C. L., Lai Y. J., Liu T. Y. A new approach for multiple objective decision making. *Computers & Operations Research*. 1993. Vol. 20, no. 8. P. 889–899. DOI: 10.1016/0305-0548(93)90109-V. (In Engl.).
18. Yoon K. P., Hwang C. L. Multiple attribute decision making: an introduction. Thousand Oaks, CA: Sage, 1995. 73 p. ISBN 0-8039-5486-7. (In Engl.).
19. Tzeng G. H., Huang J. J. Multiple attribute decision making: methods and applications. CRC Press, 2011. 352 p. DOI: 10.1201/b11032. (In Engl.).
20. Xu J., Tao Z. Rough multiple objective decision making. CRC Press, 2011. 446 p. DOI: 10.1201/b11061. (In Engl.).
21. Linkov I., Moberg E. Multi-criteria decision analysis: environmental applications and case studies. CRC Press, 2012. 204 p. DOI: 10.1201/b11471. (In Engl.).
22. Gore C., Murray K., Richardson B. Strategic decision-making. USA: Cassell Press, 1992. 242 p. (In Engl.).
23. Nasouri M., Nabi R., Amiri M. [et al.]. Performance-based Pareto optimization and multi-attribute decision making of an actual indirect-expansion solar-assisted heat pump system. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 42 (5). 103053. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103053. (In Engl.).
24. Nagar D., Ramu P., Deb K. Visualization and analysis of Pareto-optimal fronts using interpretable self-organizing map (iSOM). *Swarm and Evolutionary Computation*. 2023. Vol. 76 (4). 101202. DOI: 10.1016/j.swevo.2022.101202. (In Engl.).
25. Nikitina V. A., Sulin A. B., Muraveynikov S. S., Nikitina A. A., Makatov K. Energomodelirovaniye i eksperimental'naya verifikatsiya rezhimov raboty teplovogo nasosa pri utilizatsii teploty vytyazhnogo vozdukha. Chast' 1. Skhemnyye resheniya i raschetnaya model' [Energy modeling and experimental validation of heat pump operating modes in exhaust air heat recovery. Part 1. Design and analysis model]. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. Journal of International Academy of Refrigeration*. 2023. No. 4 (89). P. 3–10. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-3-10. EDN: GMEVFC. (In Russ.).
26. Nikitina V. A., Sulin A. B., Muraveynikov S. S., Nikitina A. A., Makatov K. Energomodelirovaniye i eksperimental'naya verifikatsiya rezhimov raboty teplovogo nasosa pri utilizatsii teploty vytyazhnogo vozdukha. Chast' 2. Energeticheskiye, ekonomicheskiye i ekologicheskiye pokazateli [Energy modeling and experimental validation of heat pump operating modes in exhaust air heat recovery. Part 2. Energy, economic and environmental indicators]. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No. 1 (90). P. 43–49. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-43-49. EDN: OJAWOM. (In Russ.).
27. Livchak V. I. Graduso-sutki otopitel'nogo perioda kak instrument sravneniya urovnya energoeffektivnosti zdaniy v Rossii i v drugikh stranakh [Degree-days of the heating period as a tool for comparing the level of energy efficiency of buildings in Russia and in other countries]. *Energoberezhniye. Energy Saving*. 2015. No. 6. P. 20–25. (In Russ.).
28. Raschet GSOP onlayn [Calculation of GSOP online]. URL: <https://lsk-lskos.ru/gsop> (accessed: 11.12.2024). (In Russ.).
- NIKITINA Veronika Aleksandrovna**, Graduate Student, Assistant of the «Energy Efficient Engineering Systems» Educational Centre, ITMO University, Saint Petersburg.
SPIN-code: 2116-2812
AuthorID (RSCI): 1278704
ORCID: 0009-0002-9721-797X
AuthorID (SCOPUS): 57257097600
Correspondence address: vanikitina@itmo.ru
- SULIN Aleksander Borisovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the «Energy Efficient Engineering Systems» Educational Centre, ITMO University, Saint Petersburg.
SPIN-code: 5540-5765
AuthorID (RSCI): 445299
ORCID: 0000-0002-4580-6070
AuthorID (SCOPUS): 6507491881
ResearcherID: W-4842-2017
Correspondence address: absulin@itmo.ru
- MURAVEINIKOV Sergey Sergeevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the «Energy Efficient Engineering Systems» Educational Centre, ITMO University, Saint Petersburg.
SPIN-code: 5034-9521
AuthorID (RSCI): 1185073
ORCID: 0000-0001-7295-5904
AuthorID (SCOPUS): 57210976736
Correspondence address: ssmuraveinikov@itmo.ru
- DMITRIEV Denis Olegovich**, Graduate Student of the «Energy Efficient Engineering Systems» Educational Centre, ITMO University, Saint Petersburg.
Correspondence address: denisdmitriev2012@gmail.com

For citations

Nikitina V. A., Sulin A. B., Muraveynikov S. S., Dmitriev D. O. Multi-criteria optimization of heat recovery unit in terms of the climatic factor. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 1. P. 46–55. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-1-46-55. EDN: JLCGRP.

Received January 24, 2025.

© V. A. Nikitina, A. B. Sulin,

S. S. Muraveynikov, D. O. Dmitriev