

Розглянуто вибір робочих середовищ для енерготрансформаційних систем на основі нечіткого багатокритеріального аналізу. Змінні управління ідентифіковані як інформаційні характеристики речовин і репрезентовані його критичними сталими. Розглянуто приклади пошуку робочих тіл альтернативних озоноруйнівним холодоагентам

Ключові слова: багатокритеріальний аналіз, нечіткі множини, робочі тіла, альтернативні холодагенти

Рассмотрен выбор рабочих сред для энерготрансформационных систем на основе методов нечеткого многокритериального анализа. Переменные управления идентифицированы как информационная характеристика вещества и представлены его критическими постоянными. Рассмотрены примеры поиска рабочих тел альтернативных озоноразрушающим хладагентам

Ключевые слова: многокритериальный анализ, нечеткие множества, рабочие тела, альтернативные хладагенты

The working media selection for the energy transforming systems has been studied as a fuzzy multicriteria analysis problem. The decision variables are considered as an information characteristics of substance and presented by its critical parameters. The example of working fluid selection to replace ozone-depleting refrigerants is considered

Keywords: multicriteria analysis, fuzzy set, working fluid, alternative refrigerants

ВЫБОР РАБОЧИХ ТЕЛ В ЭНЕРГОТРАНСФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА

С. В. Артеменко

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник*

Контактный тел.: 8-067-486-05-01

E-mail: sergey.artemenko@gmail.com

В. А. Мазур

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой*

Контактный тел.: 8 (048) 725-38-33

E-mail: mazur@paco.net

*Кафедра инженерной теплофизики

Одесская государственная академия холода
ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65082

1. Введение

Выбор рабочих сред с заранее заданной комбинацией таких свойств как минимальный парниковый эффект, низкая пожаробезопасность, нетоксичность, высокая термодинамическая эффективность, хорошие эксплуатационные характеристики и ряд других является одним из самых важных шагов при проектировании энерготрансформационных систем (ЭТС). Проблема выбора рабочих сред стала наиболее острой, в связи с развитием современных технологий, построенных на концепции устойчивого развития, сочетающей баланс между высокими энергетическими показателями и экологической безопасностью проектируемых систем. Для решения этой задачи используются достижения информационных технологий и молекулярной теории, технический опыт и экспериментальные данные [1]

- [4]. Очевидно, что рабочих сред, удовлетворяющих всем желаемым требованиям и не имеющих побочных свойств, не существует. Тем не менее, на основе современного многокритериального подхода к принятию решений удается сформулировать алгоритмы поиска "tailored", т.е. «подогнанных под фигуру» рабочих сред, обладающих желаемым набором свойств.

Существует множество критериев эффективности ЭТС и достижение экстремума для каждого из них является недостижимой мечтой проектирования. Обычно пытаются достичь компромисса между тремя основными критериями - энергетическим, экономическим и экологическим. Интегральный критерий эффективности для всей системы в целом представляется вектором **K**, включающим в себя локальные критерии **K_i** как компоненты, что отражает множество требований, предъявляемых к холодильной машине со стороны

потребителя. Достижение оптимального решения соответствует компромиссу между различными критериями и отображает сбалансированность инженерных решений. Было предложено множество методик нахождения компромисса между термодинамическими и экономическими критериями для агрегации локальных критериев в единственную целевую функцию. Основной идеей традиционного термоэкономического анализа является введение эксергетической или эксергоэкологической стоимости для упорядочивания денежных и энергетических величин. Слабым местом этого предложения является неявное допущение о соответствии экономических и энергетических целей, что противоречит реальной ситуации.

Цель данной работы – применить методы принятия решения в условиях неопределенности для поиска компромисса между энергетическими, экономическими и экологическими показателями при выборе рабочих тел в ЭТС. Термоэкономическая оптимизация рассмотрена как проблема нечеткого нелинейного программирования, где локальные критерии: энергетическая (эксергетическая) эффективность и общая стоимость продукта, наряду с экологическими ограничениями, в плохо структурированной ситуации представлены нечеткими множествами. Нахождение области компромисса или области Парето, где значение термодинамического критерия не может быть улучшено без ухудшения значения экономического (и/или экологического) критерия, рассматривается как первый шаг стратегии оптимизации. Для принятия окончательного решения использована модель Беллмана - Заде как пересечение всех нечетких критериев и ограничений. Примеры разрабатываемого подхода иллюстрируются при поиске хладагентов с низким потенциалом глобального потепления.

2. Концепция рабочих сред с заранее заданными свойствами

Постановка задачи

Критерии эффективности ЭТС (\mathbf{K}) с позиций системного анализа отображаются тройкой $\{\mathbf{K}, \mathbf{R}, \mathbf{P}\}$, где отношение \mathbf{R} – это модель технологического оператора, структура которого определяется уравнениями баланса массы, импульса и энергии, дополненными моделями характеристических уравнений состояния, в явной или неявной форме, воспроизводящих свойства веществ (\mathbf{P}). Воздействие технологического оператора на свойства веществ определяет критерии эффективности ЭТС. Набор параметров моделей свойств веществ (\mathbf{X}), как отображение экспериментальных данных о наблюдаемых свойствах \mathbf{P} , имеет смысл информационной характеристики вещества, по которой могут быть восстановлены его свойства. Физический смысл компонентов вектора \mathbf{X} является важным условием предпочтительного выбора информационной характеристики вещества и ассоциируется с его молекулярной структурой или химической формулой.

Задача компромиссного выбора рабочей среды с заранее заданным комплексом свойств математически

формулируется как многокритериальная задача математического программирования: найти

$$\text{Opt } \mathbf{K} [K_1(\mathbf{X}), K_2(\mathbf{X}), \dots, K_n(\mathbf{X})] \quad (1)$$

Здесь $K_j(\mathbf{X}) = \|\mathbf{P}_j, \mathbf{M}_j(\mathbf{X})\|$ – “расстояние” между заранее задаваемым свойством системы \mathbf{P}_j и его моделью \mathbf{M}_j . Например, для термодинамического критерия \mathbf{K}_{th} значение \mathbf{P}_j соответствует теоретическому максимуму эффективности целевой функции – эффективности цикла Карно. Решение многокритериальной проблемы заключается в нахождении компромисса между критериями и ограничениями, т.е. необходимо построить функцию

$$\mathbf{K} = K_1 \cap K_2 \cap \dots \cap K_n. \quad (2)$$

Формальное решение задачи соответствует определению оптимального вектора \mathbf{X}_{opt} такого, что $|K(\mathbf{X}_{opt})| \succ |K(\mathbf{X})|$ для любых $\mathbf{X} \neq \mathbf{X}_{opt}$, где \succ – знак предпочтения. Параметры модели \mathbf{X}_{opt} осуществляют компромиссное решение для выбранных критериев эффективности. Иными словами, параметры модели \mathbf{X}_{opt} определяют оптимальную информационную характеристику рабочей среды, обладающую желаемым комплексом свойств. Типичным примером информационных характеристик вещества, связанных с его молекулярной структурой, являются критические параметры вещества. Если известны критические параметры вещества, то на основе корреляций для вычисления термодинамических свойств удается найти основные критерии энергетической эффективности ЭТС, установить взаимосвязь с экономическими показателями и экологическими оценками. Критические параметры вещества – это информационные характеристики, которые генерируют множество целевых функций проектируемой ЭТС, хотя и не исчерпывают их полностью.

3. Соотношения информационная характеристика – свойство

Нахождение свойств \mathbf{P}_j с помощью информационных характеристик \mathbf{X} модели необходимо для определения критериев эффективности. Точность используемой техники вычислений свойств играет принципиальную роль в надежности стратегии поиска рабочей среды с заранее заданными свойствами. Например, в задаче выбора рабочей среды для холодильной системы основными критериями являются: энергетические (коэффициент преобразования – COP , температура испарителя и конденсатора – $T_{ev(cond)}$, удельная холодопроизводительность – q_0 , отношение давлений конденсатор/испаритель – P_r , рабочий объем компрессора – CD), экологические (потенциал истощения озонового слоя – ODP , потенциал глобального потепления – GWP и показатель пожароопасности – \mathbf{K}_F), а также экономические (например, цена хладагента). Этот список можно продолжить, но основная тенденция – это наличие корреляционных соотношений между информационными характеристиками вещества, которые идентифицируют рабочее

тело, и показателями эффективности, которые связаны с молекулярной формулой вещества и могут быть определены на основе эмпирических или теоретических зависимостей. Например, показатель пожароопасности современных хладагентов определяется простым соотношением между атомами фтора и водорода $K_F = n_F / (n_F - n_H)$. Если это соотношение превышает 0.7, то это вещество не является пожароопасным. Значения **ODP** для фторхлоруглеводородов коррелируют с числом атомов хлора и массой молекулы посредством соотношений [2]:

$$ODP = 0.585602 n_{Cl}^{-0.0035} \exp\left(\frac{M}{238.563}\right) \quad (3)$$

$$ODP = 0.0949956 n_{Cl}^{-0.0404477} \exp\left(\frac{M}{83.7953}\right)$$

для молекул, содержащих один и два атома углерода, соответственно.

Вычисление термодинамических свойств по информационным характеристикам (в данном случае, по критическим параметрам) проводят на основе уравнений состояния (например, уравнений Редлиха-Квонга, Пенга-Робинсона и др.). Этот класс моделей уравнений состояния предпочтительнее, благодаря его простым взаимосвязям между параметрами модели и критическими постоянными. Вычисление целевых функций по уравнению состояния обеспечивается известными термодинамическими выражениями для **COP**, **q₀** и других показателей.

Множество параметров **X_{opt}** как результат решения многокритериальной задачи (1) определяет компромиссные значения критических постоянных

$$X_{opt} (X_{1opt} = T_c^{opt}, X_{2opt} = P_c^{opt}, X_{3opt} = V_c^{opt}) \quad (4)$$

для гипотетической рабочей среды. Для того, чтобы идентифицировать искомое вещество среди множества молекулярных структур необходимо произвести поиск в базе данных (DB) по критическим свойствам в соответствии с критерием отбора

$$\{ |1 - T_c^{opt} / T_c^{DB}| + |1 - P_c^{opt} / P_c^{DB}| + |1 - V_c^{opt} / V_c^{DB}| \} \rightarrow \min \quad (5)$$

Обычно, прямого поиска вещества в базе данных достаточно для определения рабочего тела с желаемой комбинацией свойств. Более точное рассмотрение проблемы использует технику количественных соотношений “структура – свойство” (QSPR). Основная идея QSPR – это найти соотношение между структурой соединения, выраженной в терминах различных квантовохимических дескрипторов, и интересующими проектировщика целевыми функциями. Решение обратной QSPR задачи определяет химическую формулу молекулы по комплексу заданных свойств. Обычно QSPR использует две базы данных – БД критических свойств и БД структур. Корреляция между базами данных устанавливается в виде модели между параметрами – **M(P)**, параметры которой определяются минимизацией “расстояния” между экспериментальными данными **P_j** и их моделью **M_j**.

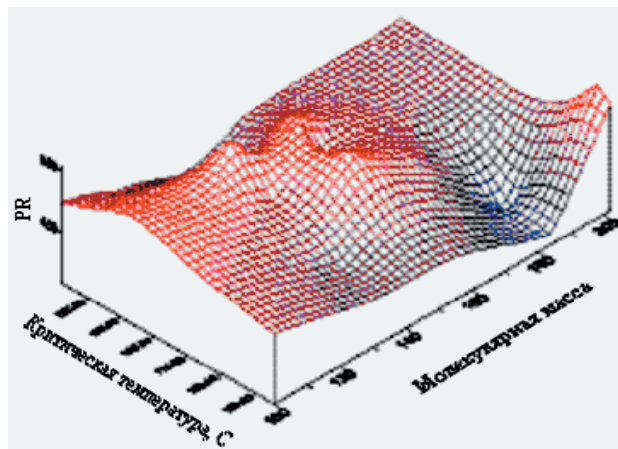


Рис. 1. Соотношение “Информационные характеристики – свойство” в пространстве двух переменных молекулярная масса – критическая температура

Для большинства рабочих тел доступны экспериментальные данные из online банков данных, например, **Chemsafe**, **Beilstein**, **Gmelin** и др. Если результаты прямых измерений недоступны, тогда их можно получить на основе моделирования термодинамических свойств и процессов (программные комплексы: **ASPEN PLUS**, **REFPROP**, **CoolPack** и др). Наиболее простая техника генерации молекулярных структур удобная для решения проблемы выбора вещества с заранее заданными свойствами была предложена Joback [5]. На рис.1, как пример, представлены результаты расчета поверхности свойств (отношение давлений конденсатор/испаритель - **P_R** выбрано в качестве одной из целевых функций) в пространстве информационных характеристик (молекулярной массы и критических температур).

4. Неопределенность в многокритериальном принятии решения

Задача нечеткого многокритериального анализа рассматривается как задача нечеткого нелинейного программирования с несколькими несовместимыми критериями (например, экономическим и термодинамическим), **m** – переменными управления и **k** нелинейными ограничениями:

$$\text{Optimize } K [K_1(\mathbf{X}), K_2(\mathbf{X}), \dots, K_n(\mathbf{X})], i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

при условии

$$C_i \equiv G_{Li} \leq G_i(\mathbf{X}) \leq G_{Ui}, i = 1, 2, \dots, k \quad (7)$$

$$X_{Li} \leq X_{xi} \leq X_{Ui}, i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

где **K_i(X)** представляют нечеткие локальные критерии эффективности; **X** (X₁, X₂, ..., X_m) – вектор искомых переменных управления; **G_{Li}**, **G_{Ui}** - нижний и верхний пределы ограничений **G_i(X)**, соответственно; **X_{Li}** и **X_{Ui}** - нижняя и верхняя границы для искомых переменных управления.

Многокритериальный подход базируется на комбинации формальной и неформальной процедур приня-

тия решения для нахождения альтернативного решения проблемы. Формальные математические средства для разрешения многокритериальной проблемы отсутствуют и необходима дополнительная экзогенная информация. Ниже предлагается следующая последовательность шагов принятия решения в нечетком многокритериальном анализе.

- Определение области оптимальности по Парето (или области компромисса) - X_P , в которой достигается согласованное решение конфликта между критериями с противоположными интересами.

- Представление критериев и ограничений в форме нечетких множеств для отображения неструктурированных ситуаций (т.н. процедура «размывания» критериев).

- Неформальный выбор схемы свертки для перехода от векторного критерия $K [K_1(X), K_2(X), \dots, K_n(X)]$ к скалярной комбинации $K_1(X), K_2(X), \dots, K_n(X)$;

- Оценка окончательного вектора $X_{opt} \in X_P$, минимизирующего нечеткие источники неопределенности.

В области Парето не существует единственного оптимального решения, скорее это множество альтернативных решений. Эти решения оптимальны в более широком смысле – не существует решений более значимых, если все цели одновременно достигнуты. Оптимальность по Парето рассматривается как инструмент для получения альтернатив, из которых разработчик может выбрать окончательное решение. В работе определение области Парето проводили при помощи алгоритма нормальных границ, предложенного в работе [6].

Следующий шаг состоит в определении окончательного набора параметров из множества Парето с помощью дополнительной внешней информации и трансформации векторного критерия в скалярный. Этот шаг фактически является проблемой принятия решения и не может быть формализован. Существует много способов преобразования векторного критерия в скалярный, которые обсуждались ранее [3]. Здесь мы используем схему Bellman и Zadeh [7], где окончательное решение достигается как результат пересечения всех нечетких критериев и ограничений, представленных функциями принадлежности $\mu(X)$:

$$\mu_K(X) = \mu_{K_{th}}(X) \cap \mu_{K_{ec}}(X) \cap \mu_{G_i}(X), i = 1, 2, \dots, k, X \in X_P \quad (9)$$

Функции принадлежности целей и ограничений могут быть выбраны разными способами в зависимости от контекста проблемы. Одна из возможных нечетких схем свертки представлена ниже:

- В качестве начального приближения выбирают вектор X . Максимальные (минимальные) значения для каждого критерия K_i устанавливаются как результат решения скалярной задачи максимизации (минимизации) для каждого из критериев. Результаты обозначены как “идеальные” точки $\{X_j^0, j=1..m\}$.

- Матрица $[T]$, где элементы диагонали – “идеальные” точки, определена следующим образом:

$$[T] = \begin{bmatrix} K_{th}(X_1^0) & K_{th}(X_2^0) \\ K_{ec}(X_1^0) & K_{ec}(X_2^0) \end{bmatrix} \quad (10)$$

- Максимальная и минимальная границы критериев определяются:

$$K_i^{min} = \min_j K_j(X_j^0) = K_i(X_i^0), i = 1..n;$$

$$K_i^{max} = \max_j K_j(X_j^0), i = 1..n. \quad (11)$$

- Функция принадлежности для всех нечетких целей представлена в виде:

$$\mu_{K_i}(X) = \begin{cases} 0, & \text{if } K_i(\%) > K_i^{max} \\ \frac{K_i^{max} - K_i}{K_i^{max} - K_i^{min}} & \text{if } K_i^{min} < K_i \leq K_i^{max}, \\ 1, & \text{if } K_i(\%) \leq K_i^{min} \end{cases} \quad (12)$$

- Нечеткие ограничения имеют следующую структуру:

$$C_j(X) \leq C_j^{max} + d_j, j = 1, 2, \dots, q \quad (13)$$

где d_j – реальный параметр, который обозначает расстояние от допустимого смещения для границы C_j^{max} j -го ограничения. Соответствующая функция принадлежности определена следующим образом:

$$\mu_{C_j}(X) = \begin{cases} 0, & \text{if } C_j(\%) > C_j^{max} \\ 1 - \frac{C_j(X) - C_j^{max}}{d_j} & \text{if } C_j^{max} < C_j(X) \leq C_j^{max} + d_j, \\ 1, & \text{if } C_j(\%) \leq C_j^{max} \end{cases} \quad (14)$$

- Окончательное решение определяется как пересечение всех нечетких критериев и ограничений, представленных их функциями принадлежности. Эта проблема сводится к стандартной проблеме нелинейного программирования: найти такие значения X и λ , при которых, максимизируя λ , будут выполнены условия:

$$\lambda \leq \mu_{K_i}(X), i = 1, 2, \dots, n;$$

$$\lambda \leq \mu_{C_j}(X), j = 1, 2, \dots, q \quad (16)$$

5. Результаты и обсуждение

Термоэкономический и экологический аудит ЭТС – это первый шаг к выбору рабочей среды среди большого разнообразия веществ, предлагаемых промышленностью. Теоретический прогноз значительно уменьшает область поиска в пространстве противоречивых экономических, экологических и технологических критериев.

В качестве приложения нечеткого многокритериального анализа был рассмотрен выбор хладагентов для ЭТС, работающей по обратному циклу Ренкина, для чистых веществ и смесей. Основные процессы в пароконденсационном цикле включают адиабатическое сжатие, изобарное охлаждение + конденсацию + переохлаждение, дросселирование, а также изобарное охлаждение + испарение + перегрев.

Были заданы следующие условия проектирования: температура испарителя и конденсатора $T_{ev}^0 = -40^\circ C, T_{cond}^0 = 35^\circ C$; общая холодопроизводительность – $q_0^0 = 0.5$ кВт, отношение давлений конденсатор/испаритель – $P_r < 10$.

Полный набор критериев проектирования включает в себя: характерную холодопроизводительность, работу адиабатического сжатия, отношение давлений конденсатор/испаритель, коэффициент

полезного действия, адиабатическую мощность, показатель пожароопасности и потенциал разрушения озонового слоя.

Однокомпонентные рабочие среды. Класс, рассмотренных веществ, представлен возможной альтернативной заменой хладагентов для R12, R134a и R502, предложенной производителями (R401A, R406A, R410A, и т.д.).

Ограничение на потенциал глобального потепления $GWP < 150$ задавали в соответствии с нормами Европейского Союза для рабочих сред автомобильных кондиционеров, которые должны вступить в силу, начиная с 2011 года.

Термодинамические свойства рабочих жидкостей и соответствующие проектные спецификации смоделированы с помощью модели уравнения состояния Peng – Robinson [8]. Расчет экономических показателей – стоимость жизненного цикла для заданного хладагента проводили по программе CoolPack [9].

Алгоритм многокритериального выбора рабочего тела с учетом экологических ограничений в условиях неопределенности реализован следующим образом:

- Термодинамические свойства и проектные характеристики парокompрессионного цикла для выборки 50 хладагентов из базы данных [10] были вычислены для заданных внешних условий.

Результаты представлены в виде функциональной связи «информационная характеристика – свойство», которая для одного из свойств – отношения давлений в конденсаторе/испарителе, иллюстрируется на рис. 1.

- Для каждого критерия среди всех конкурентных хладагентов выбрано лучшее значение проектной характеристики K_i^0 . Набор “идеальных” индексов K_i^0 представлен векторным критерием \mathbf{K} , вычисленным с помощью термодинамических свойств.

• На основе процедуры «размывания» критериев строятся функции принадлежности для целей и ограничений – зависимости (12) – (14).

- Искомое решение ищется как результат пересечения функций принадлежности для целей и ограничений. Выбор окончательного решения проводится с учетом экологического ограничения на потенциал глобального потепления путем сопоставления конкурирующих хладагентов с приблизительно одинаковы-

ми информационными характеристиками. Например, если в результате термоэкономического анализа оптимальное рабочее тело имеет гипотетическую оптимальную температуру 100°C , то в базе данных выбирается вещество с минимальным значением потенциала глобального потепления (рис. 2).

Для заданных выше требований к спецификации цикла парокompрессионной установки оптимального хладагента, заменяющего R12, R134a и R22, с $GWP < 150$ не существует. Наиболее близкими характеристиками обладают хладагент R1234yf и некоторые эфиры, которые еще недостаточно изучены и являются пожароопасными. При менее жестких требованиях к потенциалу глобального потепления оптимальными хладагентами являются смеси природных и синтетических рабочих тел.

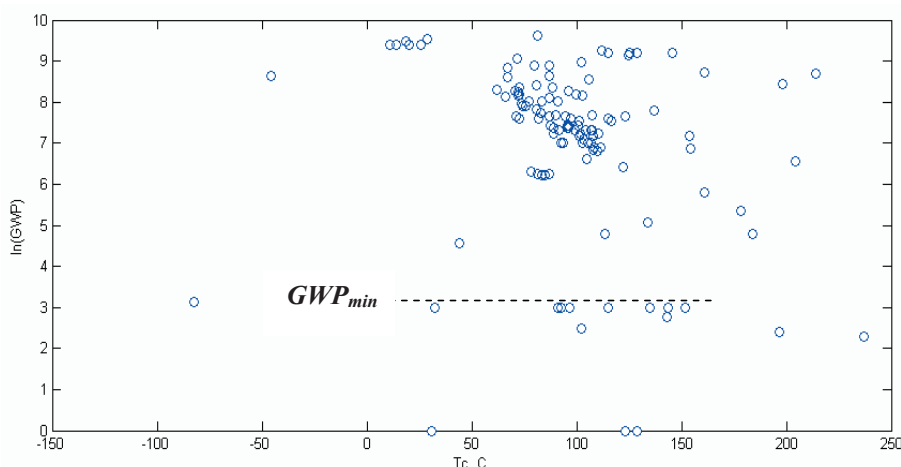


Рис. 2. База данных по потенциалу глобального потепления для основных хладагентов по классификации ASME в зависимости от их критической температуры

Двухкомпонентные рабочие среды. Исходя из экологических ограничений была рассмотрена двухкомпонентная система R744/41, для которой был подобран состав, исходя из двух критериев: термодинамического и экономического. На рис. 3 иллюстрируется поиск оптимального решения как результат пересечения двух функций принадлежности.

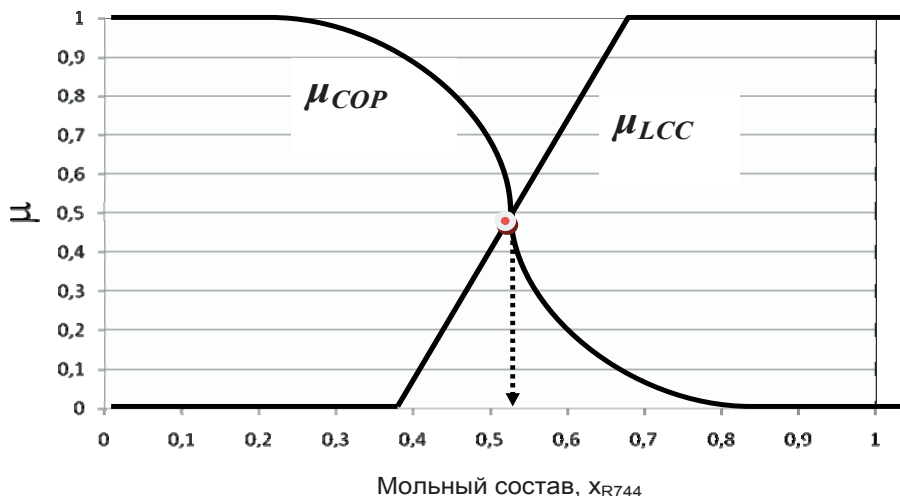


Рис. 3. Компромиссный выбор компонентов в квазиаэотропной смеси R744/41

Указанные критерии преследуют две противоположные цели: увеличение коэффициента преобразования (COP) и уменьшение стоимости жизненного цикла изделия. Термодинамический критерий варьируется от максимального значения при $x_{R744} = 0$ до минимального значения, соответствующего чистому диоксиду углерода $x_{R744} = 1$. Компромиссное решение (52% мольного состава диоксида углерода) отвечает балансу между термодинамическим и экономическим критериями.

Характеристики ЭТС с таким рабочим телом во всех случаях сопоставления оказываются предпочтительнее наиболее распространенного альтернативного хладагента R410A. На рис. 4 демонстрируется различие в коэффициентах преобразования при различных температурах в испарителе между предлагаемой смесью и чистым диоксидом углерода. Максимальное различие достигает 8% при температуре окружающей среды. В расчетах для R744 использовали программу вычислений Coolpack [10] для расчета транскритических циклов.

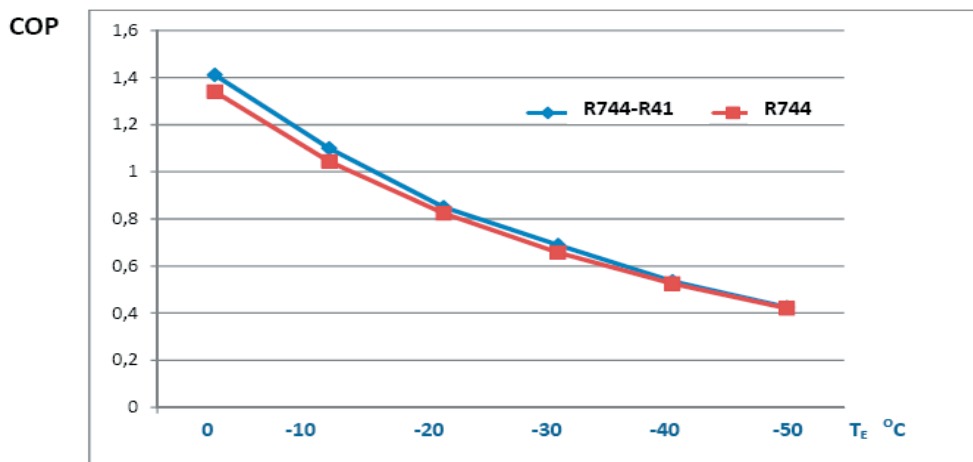


Рис. 4. Сопоставление коэффициентов преобразования смеси R744/41 и чистого

6. Выводы

Концепция рабочих сред с заранее заданными свойствами – это мощный инструмент для нахождения компромисса между энергетической эффективностью, экономической целесообразностью и экологическими ограничениями в проектировании энерготрансформационных систем.

Проблема выбора компромиссного решения среди большого разнообразия возможных двух- и многокомпонентных смесей может быть решена с помощью разработки хладагентов из натуральных и синтетических компонентов.

Смеси CO_2 с синтетическими хладагентами представляют интерес для низкотемпературных каскадных систем и расширяют область низкотемпературных приложений, ограниченную температурой затвердевания диоксида углерода. Указанная смесь R744+R41 (состав 50:50) имеет более высокое по сравнению с атмосферным давлением при температуре $32^\circ C$. Однако смеси на основе CO_2 уменьшают необходимость использования НФС рабочих сред и существенно снижают потенциал глобального потепления. Кроме того такие смеси менее токсичны и пожаробезопасны. Рекомендуемый состав для практических приложений – 50% R744: 50% R41.

обходимость использования НФС рабочих сред и существенно снижают потенциал глобального потепления. Кроме того такие смеси менее токсичны и пожаробезопасны. Рекомендуемый состав для практических приложений – 50% R744: 50% R41.

Литература

1. K.G. Joback, and G. Stephanopoulos. Designing Molecules Possessing Desired Physical Property Values. Proceedings of the Foundations of Computer- Aided Process Design (FOCAPD), Snowmass, CO, July 12-14, 363 – 387 (1989).
2. A. Duvedi and E. Achenie. Designing Environmentally Safe Refrigerants Using Mathematical Programming. Chemical Engineering Science, 51, No.15, 3727 – 3739 (1996).
3. V. Mazur. Optimum Refrigerant Selection for Low Temperature Engineering. Low Temperature and Cryogenic refrigeration. Kluwer Academic Publishers, 101 -118 (2003).
4. P. Somasundaram, R. Dinakaran and S.Iniyan. Exergy based refrigerant selection and simulation of auto refrigeration cascade (ARC) system Int. J. Exergy, 1, No. 1, 60-81 (2004).
5. K. Joback. Knowledge Bases for Computerized Physical Property Estimation. Fluid Phase Equilibria, 185, 45–52 (2001).
6. I. Das, J. Dennis. Normal Boundary Intersection: A New Method for Generating the Pareto Surface in Nonlinear Multi-criteria Optimization Problems. www.owlnet.rice.edu/~indra/NBIhomepage.html.
7. R. Bellman, L. Zadeh. Decision-making in a fuzzy environment. Management Science, 17, 141–164 (1970).
8. D.Y. Peng, D.B. Robinson. A new two-constant equation of state. Ind. Eng. Chem. Fundam, 15: 59 - 64 (1976).
9. J.M. Calm and G.C. Hourahan. Refrigerant Data Summary. Engineered Systems, 18(11), 74-88 (2001).
10. [http:// www.coolpack.dtu](http://www.coolpack.dtu).