

УДК 519.81: 629.359

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР РЕЖИМОВ РАБОТЫ АГРЕГАТОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ НЕФТИ ПРИ НЕЧЕТКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Оразбаев Батыр Бидайбекович¹,
batyr_o@mail.ru

Оразбаева Кульман Нахановна²,
kulman_o@mail.ru

Утенова Балбупе Есенжановна³,
balbupe_u_e@mail.ru

Шагаева Айнур Багитжановна³,
ai_b_sh@mail.ru

Касимова Ботакоз Рахметуллаевна¹,
Kassimovabotagoz@gmail.com

¹ Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
Казахстан, 010008, г. Нур-Султан, ул. Пушкина, 11.

² Казахский университет экономики, финансов и международной торговли,
Казахстан, г. Нур-Султан, ул. Жубанова, 7.

³ Атырауский университет нефти и газа,
Казахстан, 060006, г. Атырау, ул. Баймуханова, 45.

Актуальность исследования обосновывается тем, что при управлении процессами транспортировки нефти по магистральным трубопроводам возникает необходимость определения и выбора оптимальных режимов работы агрегатов нефтепровода с учетом нечеткости некоторой части исходной информации. В этой связи формулировка и решение задач многокритериального выбора эффективных режимов работы технологических объектов нефтепроводной системы, которые часто описываются в нечеткой информационной среде на основе математического аппарата нечетких множеств, является актуальной научно-практической задачей.

Цель: сформулировать постановку задач многокритериального выбора режимов работы технологических агрегатов нефтепровода в нечеткой информационной среде и, модифицируя различные принципы оптимальности, разработать эвристические методы их решения. Разработанные методы должны быть реализованы с привлечением лица, принимающего решения, в процессе принятия решений. Реализовать предложенный нечеткий подход к решению задачи выбора оптимального режима работы на примере станции подогрева нефти магистрального нефтепровода Узень–Самара в пункте Атырау.

Объекты: технологические агрегаты магистрального нефтепровода, которые характеризуются многокритериальностью и нечеткостью некоторых ограничений.

Методы: методы теорий нечетких множеств, методы многокритериального выбора, эвристические методы, методы нечеткого математического программирования.

Результаты. Сформулированы постановки задач многокритериального выбора режимов работы технологических агрегатов магистральных нефтепроводов в условиях нечеткости некоторой части исходной информации, и разработаны эвристические методы их решения. Предложенные эвристические методы многокритериального выбора в нечеткой среде разработаны на основе применения опыта и знаний лица, принимающего решения и модификации различных принципов оптимальности для работы в нечеткой среде. Для обеспечения возможности выбора лицом, принимающим решения, более удобного метода решения задачи выбора режима в зависимости от наличия и доступности исходной информации, предлагается набор постановки задачи выбора путем применения различных принципов оптимальности (компромиссных схем принятия решений) и их комбинации. Предложенный подход реализован при постановке и решении задачи многокритериального выбора режимов работы нефтепровода с целью оптимального управления процессом перекачки нефти по магистральному нефтепроводу Узень–Атырау–Самара (участок Кульсары–Атырау) с привлечением человека, т. е. применяя нечеткую информацию в виде его опыта, знаний и интуиций. Полученные результаты подтвердили эффективность предложенного подхода к решению поставленных задач.

Ключевые слова:

Многокритериальный выбор, транспортировка нефти, магистральные нефтепроводы, нечеткая информация, лицо, принимающее решение, эвристический метод.

Введение

Магистральные трубопроводы являются сложной разветвленной технологической системой большой протяженности. Магистральные трубопроводы, по сравнению с другими видами транспортировки жид-

ких и газообразных георесурсов, являются более эффективным и экологически безопасным видом транспортировки нефти и газа [1]. Магистральные нефтепроводы являются сложной транспортной системой, оснащенной станциями перекачки нефти (мощными

насосами), станциями подогрева нефти (при перекачке вязких нефтей) и линейными участками (собственно трубопровод), а также средствами связи, автоматики, телемеханики и противопожарными устройствами [2, 3]. Структурная схема типовой магистральной нефтепроводной системы и основные объекты исследования данной работы представлены на рис. 1.

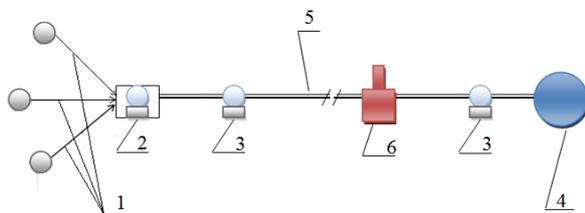


Рис. 1. Основные элементы и объекты нефтепровода, для которых необходимо выбрать режимы работы: 1 – подводные нефтепроводы, которые связывают место добычи нефти с головными сооружениями нефтепровода; 2 – головная нефтеперекачивающая станция; 3 – промежуточные нефтеперекачивающие станции; 4 – конечные пункты, принимающие продукты из магистрального нефтепровода; 5 – линейная часть нефтепровода (трубопровод); 6 – станций подогрева нефти (трубчатые печи) для перекачки вязких нефтей

Fig. 1. The main elements and objects of the oil pipeline for which it is necessary to choose operating modes: 1 – supply pipelines that connect the oil production place with the main structures of the oil pipeline; 2 – head oil pumping station; 3 – intermediate oil pumping stations; 4 – end points receiving products from the main oil pipeline; 5 – linear part of the pipeline (pipeline); 6 – oil heating stations (tube furnaces) for pumping viscous oils

При транспортировке нефти по магистральным трубопроводам часто возникают задачи выбора оптимальных режимов работы основных объектов трубопроводной системы [4, 5]. В качестве основных объектов магистрального нефтепровода в данной работе рассматриваются: станции перекачки нефти (насосные агрегаты); станции подогрева нефти (трубчатые печи) и линейная часть трубопровода. Таким образом, при управлении процессами транспортировки нефти по магистральным нефтепроводам задачи поиска и выбора эффективных режимов работы агрегатов нефтепроводной системы являются актуальными. При этом выбираемые режимы работы объектов нефтепровода должны обеспечивать экстремальные значения критериев управления, например, максимальную производительность, максимальный объем перекачки, минимальное воздействие на окружающую среду и др.

Принятие оптимальных решений по выбору эффективных режимов работы объекта – это процесс, выполняемый с участием лица, принимающего решения (ЛПР). В процессе выбора решения оцениваются альтернативы, т. е. возможные варианты решений, и производится выбор наилучшего из них по заданным

критериям [4, 6]. Оценка и выбор наилучшего решения в производственных условиях, в т. ч. в нашей задаче, производится в условиях многокритериальности, т. е. по вектору критериев экономического, экологического, технологического характера. Задача усложняется тем, что эти экономические и экологические критерии могут быть противоречивыми, а также описаны нечетко. В этих условиях задача многокритериального выбора, т. е. когда исходное множество альтернатив Ω_A известно, но неизвестен принцип оптимальности *opt*, сводится к задаче исследования предпочтений ЛПР и построению на этой основе адекватной модели выбора наилучшей по заданным критериям альтернативы [5–9].

Важность решения таких актуальных для науки и практики задач и интерес к понятию процессов анализа и сопоставления ЛПР многокритериальных альтернатив, выполняемых при выборе решения, привела к появлению ряда работ по многокритериальному выбору и по принятию решения [4, 5, 10–13]. Но следует отметить, что в проанализированных работах недостаточно исследованы и решены проблемы многокритериального выбора режимов работы сложных технологических систем в условиях противоречивых, плохо формализуемых и нечетко описываемых критериев и альтернатив. В этой связи основной целью данной работы является исследование и решение некоторых проблем задачи многокритериального выбора при нечеткости исходной информации по определению оптимальных режимов работы технологических объектов на примере основных технологических агрегатов нефтепроводной системы. Для достижения поставленной цели и решения задач используются методы принятия решений [7–10], методы многокритериальной оценки альтернатив [12, 13], методы теорий нечетких множеств [14–16], компромиссные схемы принятия решений [4–6].

Задача многокритериального выбора эффективных режимов работы агрегатов магистрального нефтепровода

Сначала формализуем задачи многокритериального выбора на примере задачи выбора режимов работы нефтепроводной системы. Для этого введем следующие обозначения: $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = f_1(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})$ – вектор экономико-экологических критериев, оценивающих качество работы нефтепроводной системы. Например, некоторые частные (локальные) критерии $f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})$ описывают экономические показатели, такие как объем перекачки, прибыль и т. д., а другие $f_{k+1}(\mathbf{x}), f_{k+2}(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})$ – экологические показатели нефтеперекачивающего производства.

$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ – вектор (множество) входных и управляемых параметров нефтепровода (объем, реологические свойства нефти, расходы реагентов, температура, давление агрегатов и т. д. Значения частных критериев зависят от $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ [3, 17–20]. На практике значения элементов этого вектора, т. е. режимных параметров, определяются в области Ω , т. е.:

$$x_j \in \Omega, \quad j = \overline{1, n}; \quad \Omega = [x_j^{\min}, x_j^{\max}],$$

здесь x_j^{\min}, x_j^{\max} – заданные технологическим регламентом минимальные и максимальные значения параметра $x_j, j=\overline{1, n}$.

Тогда задача многокритериального выбора эффективного режима работы управляемого объекта сводится к поиску и определению такого значения вектора $\mathbf{x}^*=(x_1^*, \dots, x_n^*)$, который обеспечивает оптимальное значение $\mathbf{f}(\mathbf{x}^*)=(f_1(\mathbf{x}^*), \dots, f_m(\mathbf{x}^*))$. Причем должны быть выполнены все условия заданных ограничений $\varphi_q(\mathbf{x}) \geq b_q, q=\overline{1, L}$, а также при выборе решения должны быть учтены предпочтения лица, принимающего решения.

Отметим, что функции $\varphi_q(\mathbf{x}) \geq b_q, q=\overline{1, L}$, описывающие ограничения на ресурсы, могут быть заданы технологическими регламентами и экологическими нормативами. Все или часть из них могут быть нечеткими, т. е. $\varphi_q(\mathbf{x}) \geq (\leq, =) b_q, q=\overline{1, L}$ либо $\varphi_q(\mathbf{x}) \geq b_q, q=\overline{K, L}, \varphi_q(\mathbf{x}) \leq b_q, q=\overline{1, K}$. Также и заданное число $b_q, q=\overline{1, L}$ или некоторые из них могут быть нечеткими, т. е. \tilde{b}_q .

Теперь запишем математическую постановку формализованной задачи определения оптимальных режимов работы агрегатов нефтепровода при наличии нечетких ограничений. Для этого сначала приведем задачу к удобному для применения методов теории нечетких множеств виду, введя следующие обозначения:

- $\mu_0(\mathbf{x})=(\mu_0^1(\mathbf{x}), \dots, \mu_0^m(\mathbf{x}))$ – нормализованный вектор частных критериев $f_1(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})$. Как уже отмечено, $\mu_0(\mathbf{x})=(\mu_0^1(\mathbf{x}), \dots, \mu_0^m(\mathbf{x}))$ позволяет оценить качество режимов работы агрегатов нефтепровода;
- $\mu_q(\mathbf{x}), q=\overline{1, L}$ – функции принадлежности, оценивающие степень выполнения нечетких ограничений $\varphi_q(\mathbf{x}) \geq b_q, q=\overline{1, L}$. Данные функции могут быть построены с участием ЛПП, специалистов-экспертов [19–21];
- $\gamma=(\gamma_1, \dots, \gamma_m)$ и $\beta=(\beta_1, \dots, \beta_L)$ – вектор важности критериев $(\gamma_1, \dots, \gamma_m)$ и ограничения $(\beta_1, \dots, \beta_L)$ (весовые коэффициенты). Эти весовые коэффициенты для частных критериев и ограничений считаются известными или могут быть заданы ЛПП.

Тогда в общем виде математическую постановку задачи выбора оптимальных режимов работы объектов нефтепровода в условиях многокритериальности можно записать в следующем виде:

$$\max_{\mathbf{x} \in X} \mu_0^i(\mathbf{x}), i = \overline{1, m},$$

$$X = \{ \mathbf{x} : \arg \max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}), q = \overline{1, L} \}.$$

Путем модификации и адаптации различных принципов оптимальности для работы в нечеткой информационной среде можно получить различные постановки задач многокритериального выбора режимов магистрального нефтепровода. Для эффективного решения полученной задачи с нечеткими ограничениями можно разработать и применить эвристические методы, основанные на привлечении ЛПП, специалистов-экспертов. Преимущество такого подхода к решению задачи многокритериального выбора в нечеткой среде в том, что в нем учитываются опыт, знания и интуиции человека, обеспечивается гибкость при

учете предпочтения ЛПП в процессе выбора решения [5, 12, 21, 22].

Разработка эвристических методов решения задач многокритериального выбора. Результаты исследования

Путем модификации различных принципов оптимальности при нечеткости можно получить конкретные задачи многокритериального выбора в нечеткой среде и разработать эвристические методы их решения. Разработанные эвристические методы решения задач выбора основаны на привлечение ЛПП при выборе решения. В них используются опыт, знания и интуиция ЛПП, формализованные как нечеткая информация. Например, на основе идеи принципа относительной уступки (ОУ) и принципа равенства (ПР) постановку задачи многокритериального выбора при нечеткости исходной информации запишем в следующем виде:

$$\max_{\mathbf{x} \in X} \mu_0(\mathbf{x}), \quad \mu_0(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \gamma_i \log \mu_0^i(\mathbf{x}), \quad (1)$$

$$X = \{ \mathbf{x} : \mathbf{x} \in \Omega \wedge \arg(\beta_1 \mu_1^i(\mathbf{x}) = \beta_2 \mu_2^i(\mathbf{x}) = \dots = \beta_L \mu_L^i(\mathbf{x})) \}. \quad (2)$$

В полученной постановке \wedge – знак логического «и», требующий, чтобы все условия, которые связаны через \wedge , выполнялись; $\gamma_i, i=\overline{1, m}$ и $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L$ – весовые коэффициенты, отражающие взаимную важность критериев и ограничений.

В постановке задачи (1), (2) допускается, что значения весовых коэффициентов $\gamma_1, \dots, \gamma_m$ и β_1, \dots, β_L задаются или определяются экспертом с учетом уступки со стороны ЛПП и обеспечивают одинаковые важности нечетких ограничений. При этом решение задачи (1), (2) зависит от значения весовых коэффициентов, т. е. при различных значениях этих коэффициентов получается семейство решений, а выбор наилучшего решения $\mathbf{x}^*(\gamma, \beta)$ осуществляет ЛПП на основе своего предпочтения, т. е. используя эвристические методы [23, 24].

Для решения задачи многокритериального выбора (1), (2) предлагаем следующий эвристический метод на основе принципов относительной уступки и равенства (ОУ+ПР), основные пункты которых приведены ниже:

Эвристический алгоритм на основе принципов ОУ+ПР:

1. С привлечением специалистов-экспертов и ЛПП определяются значения весовых коэффициентов частных критериев $\gamma_1, \dots, \gamma_m$ с учетом $\sum_{i=1}^m \gamma_i = 1$ и $\gamma_i \geq 0, i=\overline{1, m}$, а также вводятся значения весовых коэффициентов ограничений β_1, \dots, β_L , которые обеспечивают $\sum_{q=1}^L \beta_q = 1, \forall q, \beta_q \geq 0, q=\overline{1, L}$ и равенство $\beta_1 \mu_1^i(\mathbf{x}) = \beta_2 \mu_2^i(\mathbf{x}) = \dots = \beta_L \mu_L^i(\mathbf{x})$.
2. Если критерии $\mu_0^i(\mathbf{x})$ и весовые коэффициенты $\gamma_i, i=\overline{1, m}$ являются нечеткими, то необходимо выбрать терм-множество и построить соответствующие функции принадлежности.

3. Определяются количество шагов p_q для каждой координаты $q=1, L$.
4. Для изменения координат весовых векторов $\beta=(\beta_1, \dots, \beta_L)$ рассчитываются $h_q = \frac{1}{p_q}$, $q=1, L$ – длина шагов.
5. Меняя координаты на отрезке $[0, 1]$ на величину h_q , определяются векторы $\beta^1, \beta^2, \dots, \beta^N$, $N=(p_1+1)(p_2+1)\dots(p_L+1)$.
6. Для нечетких ограничений строятся функции принадлежности $\mu_q(\mathbf{x})$, $q=1, L$, оценивающей их степень выполнения.
7. С применением принципа ОУ решается задача максимизации: $\max_{\mathbf{x} \in X} \mu_0(\mathbf{x})$, $\mu_0(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \gamma_i \log \mu_0^i(\mathbf{x})$ и определяются текущие решения $\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q)$, обеспечивающие максимальные значения критериев $\mu_0^1(\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q)), \dots, \mu_0^m(\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q))$ и функции принадлежности $\mu_1(\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q)), \dots, \mu_L(\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q))$.
8. Вычисленные значения $\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q)$, $\mu_0^1(\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q)), \dots, \mu_0^m(\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q))$ и $\mu_1(\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q)), \dots, \mu_L(\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q))$ предъявляются ЛПР. Если текущие результаты удовлетворяют его, то он переходит к следующему пункту 9, иначе ЛПР с целью улучшения решения вводит новые значения γ_i , $i=1, m$ и/или β_q , $q=1, L$ и осуществляется переход обратно к пункту 2 алгоритма.
9. Выводятся результаты выбора ЛПР эффективных решений, т. е. значения режимных параметров $\mathbf{x}^*(\gamma_i, \beta_q)$, обеспечивающие желаемые значения локальных критериев $\mu_0^1(\mathbf{x}^*(\gamma_i, \beta_q)), \dots, \mu_0^m(\mathbf{x}^*(\gamma_i, \beta_q))$ при условии выполнения нечетких ограничений $\mu_1(\mathbf{x}^*(\gamma_i, \beta_q)), \dots, \mu_L(\mathbf{x}^*(\gamma_i, \beta_q))$.

На практике могут возникать различные производственные ситуаций, например, меняются характеристики перекачиваемого сырья, корректируются производственные планы, меняются характеристики агрегатов и приборов и т. д. Соответственно критерии выбора решений, доступность той или иной исходной информации также могут меняться. Такие ситуаций требуют адаптированных к ним постановок задач выбора оптимальных режимов работы объекта и разработки эффективных алгоритмов их решения.

Рассмотрим ситуацию, когда можно применить идеи методов главного критерия и принципа Парето оптимальности [17, 25]. В этой ситуации ЛПР, специалисты-эксперты могут выделить главный критерий $\mu_0^1(\mathbf{x})$ и назначить граничные значения для остальных локальных критериев μ_R^i , $i=2, m$, а также назначить весовые коэффициенты для ограничений β_1, \dots, β_L , учитывающих их важности. По требованию принципа Парето оптимальности количество оцениваемых объектов, в данном случае ограничений, не должно быть слишком большим, т. е. не более 7 ± 2 . В этом случае постановку задачи многокритериального выбора оптимальных режимных параметров агрегатов магистрального нефтепровода с вектором ограничений можно записать в виде [5, 26]:

$$\max_{\mathbf{x} \in X} \mu_0^1(\mathbf{x}), \quad (3)$$

$$X = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{x} : \mathbf{x} \in \Omega \wedge \arg(\mu_0^i(\mathbf{x}) \geq \mu_R^i) \wedge \\ \wedge \arg \max_{\mathbf{x} \in \Omega} \sum_{q=1}^L \beta_q \mu_q(\mathbf{x}) \sum_{q=1}^L \beta_q = 1 \wedge \beta_q > 0, \\ i = \overline{2, m}, q = \overline{1, L} \end{array} \right\}. \quad (4)$$

В постановке задачи (3), (4) введено новое обозначение – μ_R^i – граничные значения частных критериев. $\mu_0^i(x)$, $i=2, m$. Они задаются с помощью ЛПР и специалистов-экспертов.

Решение полученной задачи многокритериального выбора (3), (4) зависит от μ_R^i , $i=2, m$ и β_1, \dots, β_L , меняя их можно получить набор решений $\mathbf{x}(\mu_R^i, \beta_q)$, $i=2, m$, $q=1, L$, затем производится выбор наилучшего из них ЛПР. На основе комбинированного применения принципов главного критерия и Парето оптимальности для нечеткой информационной среды можно предложить эвристический алгоритм решения полученной задачи (3), (4).

Рассмотрим ситуацию, когда специалисты-эксперты, ЛПР могут выделить главный критерий, а идеальные точки (желаемые значения ограничений) известны или их можно определить с участием ЛПР. В этой ситуации на основе модификации и комбинации принципов главного критерия (ГК) и идеальной точки (ИТ) можно записать следующую постановку задачи многокритериального выбора эффективных режимов нефтепровода:

$$\max_{\mathbf{x} \in X} \mu_0^1(\mathbf{x}), \quad (5)$$

$$X = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{x} : \mathbf{x} \in \Omega \wedge (\mu_0^i(\mathbf{x}) \geq \mu_R^i) \wedge \\ \wedge \arg \left(\mu_q(\mathbf{x}) \geq \min_{\mathbf{x} \in \Omega} \|\mu(\mathbf{x}) - \mu^u\|_D \right), \\ i = \overline{2, m}, q = \overline{1, L} \end{array} \right\}. \quad (6)$$

В этой постановке задачи многокритериального выбора приняты обозначения: $\mu_0^i(\mathbf{x})$ – выбранный главный критерий; $\mu_0^i(x)$, $i=2, m$ – частные критерии, которые введены в состав ограничения; μ_R^i , $i=2, m$ – задаваемые ЛПР граничные значения частных критериев (кроме главного критерия); μ^u – идеальная точка; $\mu_q(\mathbf{x})$, $q=1, L$ – функции принадлежности, оценивающие степени выполнения нечетких ограничений; $\|\mu(\mathbf{x}) - \mu^u\|_D$ – используемая метрика D .

Координаты μ^u определяются в следующем виде: $\mu^u = (\max \mu_1(\mathbf{x}), \max \mu_L(\mathbf{x}))$ или в случае нормальных функций принадлежности – $\mu^u = (1, \dots, 1)$.

Блок-схема эвристического алгоритма на основе принципов главного критерия и идеальной точки (ГК+ИТ), предлагаемого для решения задачи многокритериального выбора при постановке (5), (6), приведена на рис. 2.

В блоках ввода (блок 1) и вывода (блок 9) приведенного алгоритма выбирается главный критерий с приоритетом 1 и выводятся наилучшие решения, выбранные ЛПР (блок 7) в процессе анализа текущих результатов, т. е. окончательное решение, удовлетворяющее ЛПР: $\mathbf{x}^*(\mu_R^i, \|\mu(x) - \mu^u\|_D, i=2, m)$ – значения входных, режимных параметров, которые обеспечи-

вают оптимальные значения главного критерия и других частных критериев

$$\mu_0^1(\mathbf{x}^*(\|\mu(\mathbf{x}) - \mu^u\|_E)), \mu_0^2(\mathbf{x}^*(\mu_R^2, \|\mu(\mathbf{x}) - \mu^u\|_E)), \dots, \mu_0^m(\mathbf{x}^*(\mu_R^m, \|\mu(\mathbf{x}) - \mu^u\|_E)),$$

а также максимальные значения функций принадлежности выполнения нечетких ограничений

$$\mu_1(\mathbf{x}^*(\mu_R^1, \|\mu(\mathbf{x}) - \mu^u\|_E)), \dots,$$

$$\mu_L(\mathbf{x}^*(\mu_R^i, \|\mu(\mathbf{x}) - \mu^u\|_E)), \quad i = \overline{2, m}.$$

В блоке 8 с целью улучшения решения ЛПР производится корректировка граничных значений μ_R^i , $i = \overline{2, m}$ критериев, перенесенных в состав ограничения, и/или выбирается другой вид метрики $\|\mu(\mathbf{x}) - \mu^u\|_E$.

Таким образом, решение задачи (5), (6) зависит от используемой метрики $\|\mu(\mathbf{x}) - \mu^u\|_E$, от μ_R^i , $i = \overline{2, m}$ и выбранных координат идеальной точки μ^u .

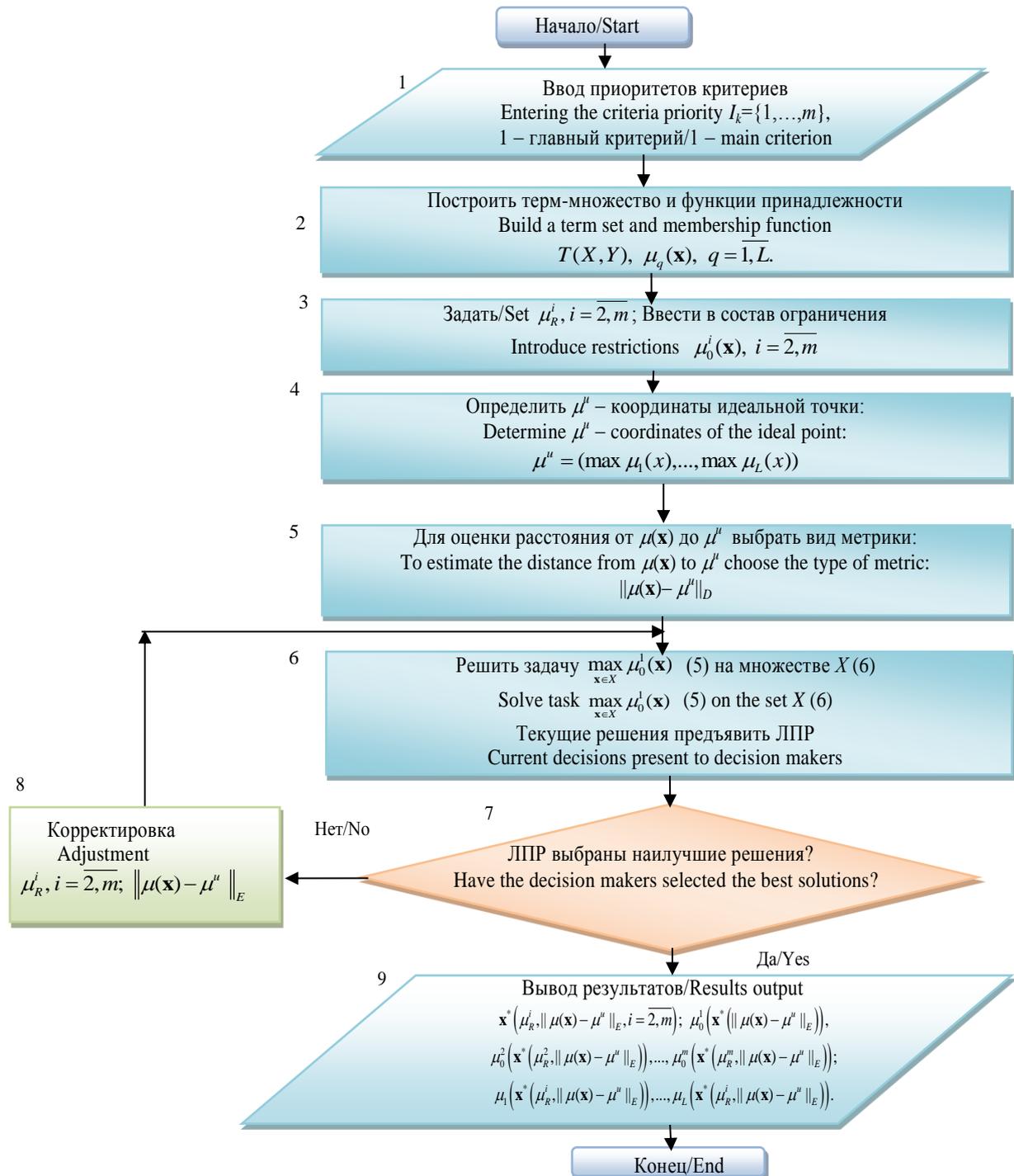


Рис. 2. Блок-схема эвристического алгоритма, основанного на принципах главного критерия и идеальной точки (ГК+ИТ)

Fig. 2. Block diagram of a heuristic algorithm based on the principles of the main criterion and ideal point (MC+IP)

Приведем несколько вариантов использования евклидовой метрики ($D=E$):

$$\|\mu(\mathbf{x}) - \mu^u\|_E^2 = \sum_{q=1}^L \beta_q \left(\frac{\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})}{\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x})} \right)^2, \quad (7)$$

$$\|\mu(\mathbf{x}) - \mu^u\|_E^2 = \sum_{q=1}^L \beta_q \left(\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x}) \right)^2, \quad (8)$$

$$\|\mu(\mathbf{x}) - \mu^u\|_E^2 = \sum_{q=1}^L \left(\frac{\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \beta_q \mu_q(\mathbf{x})}{\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x})} \right)^2. \quad (9)$$

Применение результатов на практике

Для практического применения полученных результатов используем описанный нечеткий подход при решении задачи многокритериального выбора режима работы технологических объектов. С этой целью приведем постановку и решение задачи выбора оптимального режима работы станции подогрева нефти (СПН) магистрального нефтепровода Узень-Самара в пункте Атырау. Основная задача СПН заключается в обеспечении необходимого температурного режима печей при перекачке высоковязкой нефти. При управлении СПН необходимо решить задачу выбора режимов работы печей, обеспечивающих оптимизацию критериев:

- минимизация себестоимости подогрева и перекачки нефти;
- экономия топлива и эксплуатационных расходов;
- максимизация объема перекачки нефти и производительности труда;
- повышение экологической безопасности объекта.

Объём перекачиваемой нефти можно определять показателями различных измерительных приборов, например, расходомерами. В исследуемом участке магистрального нефтепровода расход перекачиваемой нефти может принимать значения от 0,1960 до 0,1980 кг/с. На практике при измерении и оценке некоторых качественных показателей процесса перекачки и экологических показателей производства возникают проблемы, связанные с нечеткостью исходной информации. Определить эффективность работы технологического и производственного комплекса нефтепровода, экологической безопасности работы объекта одним числом очень трудно и не всегда удается. Часто измерение числовых значений этих показателей очень сложно или невозможно и характеризуется нечеткостью исходной информации. Качество работы технологических объектов, экологическое состояние производства обычно описываются нечеткими ограничениями типа: «не более», «не менее» и т. д. [22, 27].

Нефтеперекачивающее производство, как и любое другое производство, характеризуется и экономическими, и экологическими, и другими критериями. На практике требуется улучшить значения всех этих критериев, например, максимизировать объем перекачиваемой нефти, а расходы ресурсов и экологической нагрузки минимизировать. Так как эти критерии

в определенной области противоречат друг другу, оптимизация всех критериев одновременно становится невозможной. В этих ситуациях приходится решать задачу многокритериального выбора и принятия решений, позволяющую определить наилучшее решение в области компромиссов. Как было обосновано выше, такие задачи характеризуются нечеткостью и более эффективно решаются с привлечением ЛПР, т. е. эвристическими методами.

Формализуем задачу выбора наилучшего режима работы СПН пункта Атырау исследуемого нефтепровода. Для удобного применения методов теории нечетких множеств введем следующие обозначения: $\mu_0(\mathbf{x}) = (\mu_0^1(\mathbf{x}), \mu_0^2(\mathbf{x}), \mu_0^3(\mathbf{x}))$ – вектор нормализованных частных критериев, оценивающих качество работы станции подогрева нефти. Составляющими данного вектора, т. е. частными критериями являются: $\mu_0^1(\mathbf{x})$ – объем подогретой нефти на выходе (производительность) печи подогрева; $\mu_0^2(\mathbf{x})$ – температура на выходе печи; $\mu_0^3(\mathbf{x})$ – давление на выходе СПН.

Пусть $\varphi_q(\mathbf{x}) \geq b_q$, $q=1,2$ – нечеткие экологические ограничения. Считаем, что построены функции принадлежности, описывающие степени выполнения этих нечетких ограничений: $\mu_q(\mathbf{x})$, $q=1,2$. Также считаем, что задана или имеется возможность определения ряда приоритетов критериев $I_k = \{1,2,3\}$ и весовых коэффициентов ограничений β_1, β_2 .

Как видно, частные критерии $\mu_0^1(\mathbf{x}), \mu_0^2(\mathbf{x}), \mu_0^3(\mathbf{x})$ и нечеткие ограничения $\varphi_q(\mathbf{x}) \geq b_q$, $q=1,2$ зависят от вектора $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)$, где x_1 – температура в печи, x_2 – давление в печи, x_3 – расход топлива на входе СПН, x_4 – расход (объем) нефти на входе СПН. Эти зависимости определяются на основе математических моделей СПН, которые разработаны в [17, 28–30].

Сформулированную задачу многокритериального выбора оптимальных режимов работы станции подогрева нефти в условиях нечеткости некоторой части исходной информации можно записать аналогично (5), (6) в следующем виде:

$$\max_{\mathbf{x} \in X} \mu_0^1(\mathbf{x}), \quad (5^*)$$

$$X = \left\{ \mathbf{x} : \mathbf{x} \in \Omega \wedge (\mu_0^i(\mathbf{x}) \geq \mu_r^i) \wedge \bigwedge_{i=2,3} \arg \left(\mu_q(\mathbf{x}) \geq \min_{\mathbf{x} \in \Omega} \|\mu(\mathbf{x}) - \mu^u\|_E \right), \right. \\ \left. i = 2, 3, q = 1, 2 \right\}. \quad (6^*)$$

В постановке задачи (5^{*}), (6^{*}) используются следующие обозначения: $\mu_0^1(\mathbf{x})$ – максимизируемый главный критерий, в нашем случае производительность станции подогрева нефти; $\mu_0^i(\mathbf{x})$, $i=2,3$ – температура и давление на выходе СПН, частные критерии, перенесенные в состав ограничения; μ_r^i , $i=2,3$ – граничные значения локальных критериев, включенные в состав ограничений; μ^u – идеальная точка, означающая желаемое значение ограничения; $\mu_1(\mathbf{x}), \mu_2(\mathbf{x})$ – функции принадлежности выполнения нечетких ограничений; $\|\mu(\mathbf{x}) - \mu^u\|_E$ – используемая евклидова метрика E , $\mu^u = (\max \mu_1(\mathbf{x}), \max \mu_2(\mathbf{x}))$ или $\mu^u = (1,1)$ – координаты идеальной точки.

Наилучшим решением задачи многокритериально-го выбора эффективных режимов работы станции подогрева нефти (5*), (6*) пункта Атырау магистрально-го нефтепровода Узень–Атырау–Самара является та-кие значения режимных параметров $x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*$, ко-торые обеспечивают максимум $\mu_0^1(\mathbf{x})$ и максимал-ные степени выполнения нечетких ограничений $\mu_1(\mathbf{x})$, $\mu_2(\mathbf{x})$. При выборе решения учитывается предпочте-ние ЛПР, и при этом выбранные режимы работы станции подогрева нефти должны удовлетворять ЛПР.

Приведем результаты решения полученной задачи многокритериального выбора режимов работы СПН (5*), (6*) с применением модификации вышеописанно-го эвристического алгоритма, основанного на принци-пах главного критерия и идеальной точки (ГК+ИТ).

1. Специалистами-экспертами, ЛПР определен ряд приоритетов для частных критериев $I_k = \{1, 2, 3\}$. В ка-честве главного критерия выбрана производительность станции подогрева нефти (объем подогретой нефти), который имеет приоритет 1, приоритет 2 при-своен температуре на выходе печи, а давление на вы-ходе печей имеет приоритет 3.

2. Для описания нечетких параметров и ограниче-ний ЛПР, специалистами-экспертами определено терм-множество и построены функции принадлежно-сти, оценивающие степени выполнения нечетких ограничений: $\mu_q(x)$, $q=1, 2$. Терм- множество состоит из следующих основных термов: «не более»; «около»; «не менее». При необходимости дополнительные термы получают из основных с применением различ-ных модификаторов типа «очень», «примерно» и т. д. Построенные функции принадлежности выполнения нечетких ограничений имеют вид:

$$\mu_1(x) = \exp(0, 20 | a_1 - 50, 0 |^{0.5});$$

$$\mu_2(x) = \exp(0, 10 | a_2 - 80, 0 |^{0.7}),$$

где a_1, a_2 – средние числовые значения нечетких па-раметров, соответственно: температуры и давления печи (СПН) на выходе, а другие параметры 0,20; 0,5; 0,10; 0,7 являются идентифицированными коэффици-ентами грубой и точной аппроксимации.

3. Разработаны модели для определения частных кри-териев $\mu_0^i(\mathbf{x})$, $i=2, 3$, которые перенесены в состав ограни-чения, и заданы граничные значения для них μ_R^i , $i=2, 3$:

$$\mu_0^2(x) = \begin{bmatrix} 7 + 1, 2x_1 - 0, 25x_2 + 5, 7x_3 - \\ -1, 3x_4 + 1, 8x_1^2 + 8, 3x_3^2 \end{bmatrix}; \mu_R^2 = 55;$$

$$\mu_0^3(x) = \begin{bmatrix} 0, 25 - 1, 31x_1 + 7, 35x_2 - 3, 1x_3 + \\ + 2, 25x_4 + 9, 85x_2^2 + 8, 7x_3^2 \end{bmatrix}; \mu_R^3 = 8, 5.$$

4. Так как функции принадлежности нечетких ограни-чений являются нормальными, координаты идеальной точки определены как: $\mu^u = (1, 1)$.

5. Для оценки расстояния между $\mu(\mathbf{x})$ и μ^u выбрана евклидова метрика $\|\mu(x) - \mu^u\|_E$. В нашем случае вид метрики определен следующим образом:

$$\|\mu(x) - \mu^u\|_E^2 = \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q \left(\max_{x \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x}) \right) \right)^2,$$

где β_q – весовой коэффициент q -го нечеткого ограни-чения, задаваемый ЛПР.

6. Решается задача максимизации главного крите-рия $\max_{x \in X} \mu_0^1(\mathbf{x})$ (5*) на множестве допустимых реше-ний, определяемого по выражению (6*). При этом за-висимость главного критерия от вектора режимных параметров $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ определена по модели, ко-торая предложена в работах [17, 30], и имеет вид не-четкой модели после преобразования на основе мно-жества уровня α , для $\alpha = 0,5; 0,85; 1$, имеет вид:

$$\mu_0^1(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \frac{0,5}{2,000254727} + \frac{0,85}{2,007525117} + \\ \frac{1}{2,088235294} + \frac{0,85}{2,175725157} + \frac{0,5}{2,787515357} \end{pmatrix} x_1 + \\ + \begin{pmatrix} \frac{0,5}{7,001000000} + \frac{0,85}{7,010000000} + \\ \frac{1}{7,100000000} + \frac{0,85}{7,101523567} + \frac{0,5}{7,156572378} \end{pmatrix} x_2 - \\ - \begin{pmatrix} \frac{0,5}{5,005700000} + \frac{0,85}{5,012500000} + \\ \frac{1}{5,680000000} + \frac{0,85}{5,750000000} + \frac{0,5}{5,950000000} \end{pmatrix} x_3 + \\ + \begin{pmatrix} \frac{0,5}{0,003700000} + \frac{0,85}{0,055000000} + \\ \frac{1}{0,400000000} + \frac{0,85}{0,450000000} + \frac{0,5}{0,500000000} \end{pmatrix} x_4 + \\ + \begin{pmatrix} \frac{0,5}{0,000378677} + \frac{0,85}{0,007725335} + \\ \frac{1}{0,061418685} + \frac{0,85}{0,097733375} + \frac{0,5}{0,134457767} \end{pmatrix} x_1^2 + \\ + \begin{pmatrix} \frac{0,5}{0,600000000} + \frac{0,85}{0,650000000} + \\ \frac{1}{0,710000000} + \frac{0,85}{0,760000000} + \frac{0,5}{0,820000000} \end{pmatrix} x_2^2 - \\ - \begin{pmatrix} \frac{0,5}{0,180300000} + \frac{0,85}{0,200100000} + \\ \frac{1}{0,227200000} + \frac{0,85}{0,247200000} + \frac{0,5}{0,267200000} \end{pmatrix} x_3^2 + \\ + \begin{pmatrix} \frac{0,5}{0,00000373} + \frac{0,85}{0,000077540} + \\ \frac{1}{0,000563380} + \frac{0,85}{0,003735470} + \frac{0,5}{0,012557370} \end{pmatrix} x_4^2 - \\ - \begin{pmatrix} \frac{0,5}{0,006000000} + \frac{0,85}{0,007000000} + \\ \frac{1}{0,008000000} + \frac{0,85}{0,009000000} + \frac{0,5}{0,010000000} \end{pmatrix} x_3 x_4.$$

Затем нечеткие коэффициенты, детерминирован-ные на α уровнях, объединяются по правилу теории нечетких множеств [16]. В приведенной модели зна-чения коэффициентов регрессии везде оставлены де-вятизначными после десятичной точки, т. е. как в расчетном варианте на компьютерах.

Задача максимизации с учетом наложенных огра-ничений решена с использованием методов матема-тического программирования [31]. Определены сле-дующие текущие решения:

$$\mathbf{x} \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right),$$

$i=2,3$ – вектор режимных параметров;

$$\mu_0^i \left(\mathbf{x} \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right),$$

$i=2,3$ – значение главного критерия,

$$\mu_0^2 \left(\mathbf{x} \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right),$$

$$\mu_0^3 \left(\mathbf{x} \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right),$$

$i=2,3$ – значения частных критериев, перенесенных в состав ограничения;

$$\mu_1 \left(\mathbf{x} \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right),$$

$$\mu_2 \left(\mathbf{x} \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right),$$

$i=2,3$ – значения функции принадлежности, оценивающие степени выполнения ограничений.

7. Значения результатов каждого цикла предъявлены ЛПР (технологу и старшему оператору, управляющим процессом подогрева). С первого по пятый цикл ими вносились корректировки в значения $\mu_R^2(x)$, $\mu_R^1(x)$ и поиск приемлемого решения повто-

рялся, начиная с предыдущего пункта, а после пятого цикла получены решения, удовлетворяющие ЛПР, и произведен переход к пункту 8.

8. ЛПР принято окончательное решение, которое является наилучшим: значения управляющих, режимных параметров

$$\mathbf{x}^* \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right),$$

которые обеспечивают оптимальные значения частных критериев

$$\mu_0^1 \left(\mathbf{x}^* \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right),$$

$$\mu_0^2 \left(\mathbf{x}^* \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right),$$

$$\mu_0^3 \left(\mathbf{x}^* \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right)$$

и максимальные значения функций принадлежности выполнения ограничений

$$\mu_1 \left(\mathbf{x}^* \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right),$$

$$\mu_2 \left(\mathbf{x}^* \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right).$$

Числовые значения результатов, полученные после шестого цикла занесены в таблицу.

Таблица. Результаты решения задачи многокритериального выбора по детерминированному методу [27], по предложенному методу (ГК+ИТ) и реальных значений (производственные данные)

Table. Results of solving the multi-criteria selection problem by the deterministic method [27], by the proposed method (MC+IP) and real values (production data)

Критерии и ограничения Criterion and limitations	Детерминированный метод Deterministic method	Алгоритм ГК+ИТ MC+IP algorithm	Реальные значения Actual values
Производительность СПН, кг/с – критерий \tilde{y}_1 Performance of oil heating stations, kg/s – criterion \tilde{y}_1	0,1960	≈0,1970	0,1965
Температура на выходе печи, К – критерий y_2 Furnace outlet temperature, K – criterion y_2	321,15	323,15	323,15
Давление на выходе печи, кПа – критерий y_3 Furnace outlet pressure, kPa – criterion y_3	101,51	96,54	96,70
Степень выполнения ограничения 1 – $\mu_1(\mathbf{x}^*(\beta))$ Degree of compliance with restriction 1 – $\mu_1(\mathbf{x}^*(\beta))$	–	1,0	–
Степень выполнения ограничения 2 – $\mu_2(\mathbf{x}^*(\beta))$ Degree of compliance with restriction 2 – $\mu_2(\mathbf{x}^*(\beta))$	–	0,98	–
Оптимальное значение вектора режимных параметров $\mathbf{x}^*=(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)$: Optimal value of the vector of operational parameters $\mathbf{x}^*=(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)$: x_1^* – оптимальная температура на входе печи, К x_1^* – optimal furnace inlet temperature, K	308,15	306,15	307,15
x_2^* – оптимальное давление на входе печи, кПа x_2^* – optimal furnace inlet pressure, kPa	125,40	117,04	119,42
x_3^* – оптимальный расход топлива, кг/с x_3^* – optimal fuel consumption, kg/s	0,0075	0,0069	0,0072
x_4^* – оптимальный объем сырья (нефти) на входе печи, кг/с x_4^* – optimal volume of raw materials (oil) at the inlet of the furnace, kg/s	0,1970	0,1970	0,1970

Примечание: (–) параметры не определяются и не измеряются. Время, необходимое для решения задач в методах почти одинаковое.

Note: (–) parameters are not determined and not measured. The time required to solve task in the methods is almost the same.

Обсуждение результатов

По результатам анализа и обсуждения решения задачи выбора эффективного режима работы исследуемой станции подогрева нефти с применением предложенного нечеткого подхода, которые приведены в таблице, можно отметить:

- при решении задачи многокритериального выбора режимов печей подогрева нефти разработанный эвристический алгоритм, основанный на принципах главного критерия и идеальной точки, позволяет получить результаты, которые лучше совпадают с реальными данными, по сравнению с результатами детерминированного подхода;
- так как нечеткая информация от специалистов-экспертов, ЛПР позволяет правильно учитывать сложную связь между параметрами производственного объекта – СПН, повышается адекватность и эффективность решения задачи выбора режимов работы управляемого реального объекта;
- преимуществом предложенного эвристического метода решения поставленной задачи также является то, что этот метод позволяет оценить и обеспечить выполнение нечетких ограничений.

Правильность результатов решения поставленной задачи многокритериального выбора обеспечивается корректным использованием методов экспертных оценок и теории нечетких множеств, а также методов многокритериальной оптимизации и принятия решений. Как видно из приведенной таблицы, расчетные результаты, полученные на основе предложенного алгоритма, основанного на принципах главного критерия и идеальной точки, лучше совпадают с реальными данными, а степени выполнения нечетких ограничений достаточно высокие (1; 0,98).

Заключение

На основе модификации и комбинации различных принципов оптимальности предложены новые постановки задач многокритериального выбора режимов работы технологических агрегатов (на примере станции подогрева нефти нефтепровода) в условиях нечеткости исходной информации и разработаны эвристические методы решения поставленных задач. Предложенные методы основаны на использовании идеи различных принципов оптимальности, комбинации компромиссных схем принятия решений. Постановки конкретных задач получены путем комбинации принципов относительной уступки и равенства, главного критерия и идеальной точки, на основе адаптации их для нечеткой среды.

В качестве основных результатов исследования можно выделить:

- исследованы и формализованы задачи многокритериального выбора эффективных режимов работы технологических объектов (на примере агрегатов магистрального нефтепровода), которые ха-

рактеризуются многокритериальностью и нечеткостью исходной информации;

- сформулирована математическая постановка задачи выбора оптимальных режимов работы объектов нефтепровода в условиях многокритериальности и нечеткости. Показано, что путем модификации и адаптации различных принципов оптимальности для работы в нечеткой информационной среде можно получить различные постановки задач многокритериального выбора режимов магистрального нефтепровода;
- на основе принципов относительной уступки и равенства, главного критерия и идеальной точки получены постановки задачи многокритериального выбора при нечеткости исходной информации и разработаны эвристические алгоритмы их решения.

Также приведены результаты реализации предложенного подхода на практике при решении задачи многокритериального выбора оптимального режима работы станции подогрева нефти магистрального нефтепровода Узень–Самара в пункте г. Атырау. Для практической реализации предложенного подхода к решению поставленной задачи выбран предложенный эвристический алгоритм, основанный на принципах главного критерия и идеальной точки. По результатам расчета обоснована эффективность применения нечеткого подхода к решению задач многокритериального выбора режимов работы СПН с использованием эвристического алгоритма, основанного на принципах главного критерия и идеальной точки.

Оригинальность и новизна работы заключается в том, что задача многокритериального выбора на основе эвристических алгоритмов решается в нечеткой среде. При этом в отличие от известных методов не производится замена исходной нечеткой задачи с эквивалентными детерминированными задачами. Это позволяет максимально использовать исходную нечеткую информацию и получить адекватное решение производственной задачи в условиях нечеткости. Таким образом, обеспечивается эффективное применение методов многокритериального выбора в нечеткой среде.

Практическим преимуществом предложенного подхода к решению задач многокритериального выбора в нечеткой среде является то, что в зависимости производственной ситуации и доступности исходной информации различного характера ЛПР дается возможность выбора более подходящего, приемлемого способа решения задачи из предложенного набора алгоритмов.

Перспективы дальнейших научных исследований в данном направлении заключается в разработке математического обеспечения различных систем управления, например, интеллектуализированных систем поддержки принятия решений по управлению режимами работы технологических объектов магистрального нефтепровода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайншток С.М. Трубопроводный транспорт нефти. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 407 с.
2. Бакаев А.А., Олерях Г.Б., Иванина Д.С. Математическое моделирование при проектировании трубопроводов. – Киев: Наукова думка, 1990. – 357 с.
3. Селезнев В.Е., Прялов С.Н. Методы построения моделей течений в магистральных трубопроводах. – М.: Едиториал, 2018. – 565 с.
4. Larichev O.I. Properties of the decision methods in the multicriteria problems of individual choice // Automation and Remote Control. – 2002. – V. 63. – № 2. – P. 304–315.
5. Abdymanapov S.A., Barlybayev A., Kuzenbaev B.A. Quality evaluation fuzzy method of automated control systems on the LMS example // IEEE Access. – 2019. – V. 7. – P. 138000–138010. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2943000
6. Decision-making in the fuzzy environment on the basis of various compromise schemes / B. Orazbayev, E. Ospanov, N. Kissikova, N. Mukataev, K. Orazbayeva // Procedia Computer Science. – 2017. – V. 120. – P. 945–952.
7. Groppen V.O. Principles of reference-aided decision-making // Automation and Remote Control. – 2006. – V. 67. – № 4. – P. 660–675.
8. Dimitriadi G.G., Larichev O.I. Decision support system and the ZAPROS-III method for ranking the multiattribute alternatives with verbal quality estimates // Automation and Remote Control. – 2005. – V. 66. – № 8. – P. 1322–1335.
9. A hybrid method for the development of mathematical models of a chemical engineering system in ambiguous conditions / B.B. Orazbayev, E.A. Ospanov, K.N. Orazbayeva, L.T. Kurmangazieva // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2018. – V. 10. – № 6. – P. 748–758.
10. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М.: Наука, 1981. – 325 с.
11. Rademaker M., Bernard B. Aggregation of monotone reciprocal relations with application to group decision making // Fuzzy Sets and Systems. – 2018. – V. 184. – P. 29–51.
12. Biegler L.T., Lang Y.D., Lin W.J. Multi-scale optimization for process systems engineering // Computers and Chemical Engineering. – 2016. – № 10. – P. 17–35.
13. Promoting data requirement for the oil & gas pipeline integrity management / Zhenpei Li, Jinfei Wang, R. Brook, R. Easton // Oil Gas European Magazine. – 2017. – V. 132. – P. 167–193.
14. Dubois D. The role of fuzzy sets indecision sciences: old techniques and new directions // Fuzzy Sets and Systems. – 2011. – V. 184. – P. 3–17.
15. Сулейменов Б.А. Интеллектуальные и гибридные системы управления технологическими процессами. – Алматы: Изд-во «Пикла и К», 2009. – 304 с.
16. Рыжов А.П. Теория нечетких множеств и ее приложений. – М.: Изд-во МГУ, 2017. – 115 с.
17. Оразбаев Б.Б., Мухамбеткалиева А.К., Мырзашева А.Н. Задачи принятия решений для управления технологическим объектом в нечеткой среде и эвристические методы их решения // Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. – 2017. – № 4 (119). – С. 142–147.
18. Богданов Р.М. Программный комплекс для моделирования работы магистральных трубопроводов // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. – 2014. – № 1. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Bogdanov/Bogdanov_4.pdf (дата обращения 01.08.2019).
19. Grebenyuk G.G. Mathematical modeling as a decision tool in the control of urban heat supply // Automation and Remote Control. – 2006. – V. 67. – № 5. – P. 805–812.
20. Зыков В.В. Математическое моделирование и оптимизации процессов сбора, подготовки и транспортировки нефти и газа. – Тюмень: Недра, 1990. – 327 с.
21. Baronets V.D., Grechikhin M.A. A model for representing the membership function in expert systems // Automation and Remote Control. – 2017. – V. 53. – № 6. – P. 921–925.
22. The etalon models of linguistic variables for sniffing-attack detection / M. Karpinski, A. Korchenko, P. Vikulov, R.R. Kochan, A. Balyk, R. Kozak // 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS 2017). – Bucharest, Romania, 21–23 September 2017. – P. 258–264. DOI: 10.1109/IDAACS.2017.8095087
23. Многокритериальная оптимизация при управлении химико-технологической системой производства бензола при нечеткой информации / Б.Б. Оразбаев, Е.А. Оспанов, К.Н. Оразбаева, Б.А. Серимбетов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 7. – С. 182–194.
24. Применение эвристических алгоритмов в анализе данных для решения задачи диагностирования электроцентробежных насосных установок / Р.И. Валиахметов, В.У. Ямалиев, С.С. Шубин, А.В. Алферов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 159–167.
25. Pershin Yu. Pareto-optimal and lexicographic solutions of mixed-integer problems that are linear with respect to continuous variables // Automation and Remote Control. – 1994. – V. 55. – № 2. – P. 263–270.
26. Czuprat O. Simulation method aids pigging operation in subsea waxy crude oil pipelines // Oil Gas European Magazine. – 2018. – V. 132. – P. 200–223.
27. Определение ряда оптимальных режимов работы магистральных трубопроводов при выбранных критериях оптимальности (ОРОПМТ): пат. Рос. Федерация № 2011611173, заявл. 15.01.10; опубл. 04.02.11, Бюл. № 2. – 1 с.
28. Calculations for energy-saving modes for batching oil blends itrunk pipelines / U.K. Zhapbasbaev, E.S. Makhmotov, G.I. Ramazanova, T.T. Bekibaev // Pipeline Science and Technology. – 2018. – V. 2. – № 3. – P. 221–230.
29. Селезнев В.Е. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем: методы, модели и алгоритмы. – М.: МаксПресс. 2009. – 695 с.
30. Мухамбеткалиева А.К. Проблемы математического моделирования технологического комплекса магистральных нефтепроводов и подходы к их решению // Поиск. – 2006. – № 4. – С. 229–235.
31. Grossmann I.E. Challenges in the application of mathematical programming in the enterprise-wide optimization of process industries // Теоретические основы химической технологии. – 2014. – Т. 48. – № 5. – С. 500–517.

Поступила 18.11.2020 г.

Информация об авторах

Оразбаев Б.Б., доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и управления Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева.

Оразбаева К.Н., доктор технических наук, профессор кафедры менеджмента Казахского университета экономики, финансов и международной торговли.

Утенова Б.Е., кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производства и информационных технологий Атырауского университета нефти и газа.

Шагаева А.Б., старший преподаватель кафедры автоматизации производства и информационных технологий Атырауского университета нефти и газа.

Касимова Б.Р., кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и управления Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева.

UDC 519.81: 629.359

MULTI-CRITERIA SELECTION OF OPERATING MODES OF MAIN PIPELINE UNITS DURING OIL TRANSPORTATION WITH FUZZY INFORMATION

Batyr B. Orazbayev¹,
batyr_o@mail.ru

Kulman N. Orazbayeva²,
kulman_o@mail.ru

Balbupe E. Utenova³,
balbupe_u_e@mail.ru

Ainur B. Shagayeva³,
ai_b_sh@mail.ru

Botakoz R. Kassimova¹,
Kassimovabotagoz@gmail.com

¹ L.N. Gumilyov Eurasian National University,
11, Pushkin street, Nur-Sultan, 010008, Kazakhstan.

² Kazakh University of Economics, Finance and International Trade,
7, Zhubanov street, Nur-Sultan, 010005, Kazakhstan.

³ Atyrau University of Oil and Gas,
45, Baimukhanov street, Atyrau, 060006, Kazakhstan.

The relevance of the research is justified by the fact that when managing oil transportation through trunk pipelines, it becomes necessary to determine and select the optimal operating modes of the pipeline units, taking into account the vagueness of some part of the initial information. In this regard, the formulation and solution of the problems of multi-criteria selection of effective operating modes of technological objects of the oil pipeline system, which are often described in a fuzzy information environment based on the mathematical apparatus of fuzzy sets, is an urgent scientific and practical task.

The main aim of the research is to formulate the problem statements of the multi-criteria selection of operating modes of technological objects with fuzzy initial information based on the adaptation of various principles of optimality and develop heuristic methods for their solution, which are based on attracting a decision maker in solving the problem. Implement the proposed fuzzy approach to solving the problem of selecting the optimal operating mode for the oil heating station of the Uzen–Samara trunk oil pipeline in Atyrau.

Objects: technological units of the main oil pipeline, which are characterized by multi-criteria and unclear certain restrictions.

Methods: methods of theories of fuzzy sets, methods of multicriteria choice, heuristic methods, methods of fuzzy mathematical programming.

Results. The authors have stated the problems of multi-criteria selection of operating modes of technological units of main oil pipelines in the conditions of fuzziness of some part of the initial information and developed the heuristic methods for their solution. The proposed heuristic methods of multi-criteria selection in a fuzzy environment are developed based on the application of experience and knowledge of the decision maker and modification of various optimality principles for working in a fuzzy environment. To ensure that the decision maker can choose a more convenient method of solving the choice problem depending on the availability and accessibility of the source information, the current situation, a set of statement of the choice problem is proposed by applying various principles of optimality (compromise decision-making schemes) and their combination. The proposed approach was implemented in formulating and solving the problem of multi-criteria selection of operating modes of the pipeline with the aim of optimally controlling the process of pumping oil through the Uzen–Atyrau–Samara trunk pipeline (Kulsary–Atyrau section) with the involvement of a person, i. e. applying fuzzy information in the form of his/her experience, knowledge and intuition. The obtained results confirmed the effectiveness of the proposed approach to solving the tasks.

Key words:

Multi-criteria selection, oil transportation, oil trunk pipelines, fuzzy information, decision maker, heuristic method.

REFERENCES

1. Vainshtok S.M. *Truboprovodny transport nefiti* [Pipeline transportation of oil]. Moscow, Nedra-Business Center LLC Publ., 2002. 407 p.
2. Bakaev A.A., Oleryash G.B., Ivanina D.S. *Matematicheskoe modelirovaniye pri proektirovaniy truboprovodov* [Mathematical modeling in the design of pipelines]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1990. 357 p.
3. Seleznev V.E., Pryalov S.N. *Metody postroyeniya modeley techeniy v magistralnykh truboprovodakh* [Methods for constructing models of flows in main pipelines]. Moscow, Editorial Publ., 2018. 565 p.
4. Larichev O.I. Properties of the decision methods in the multicriteria problems of individual choice. *Automation and Remote Control*, 2002, vol. 63, no. 2, pp. 304–315.
5. Abdymanapov S.A., Barlybayev A., Kuzenbaev B.A. Quality evaluation fuzzy method of automated control systems on the LMS example. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 138000–138010. DOI :10.1109/ACCESS.2019.2943000
6. Orazbayev B., Ospanov E., Kissikova N., Mukataev N., Orazbayeva K. Decision-making in the fuzzy environment on the basis of various compromise schemes. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 120, pp. 945–952.
7. Groppen V.O. Principles of reference-aided decision making. *Automation and Remote Control*, 2006, vol. 67, no. 4, pp. 660–675.

8. Dimitriadi G.G., Larichev O.I. Decision support system and the ZAPROS-III method for ranking the multiattribute alternatives with verbal quality estimates. *Automation and Remote Control*, 2005, vol. 66, no. 8, pp. 1322–1335.
9. Orazbayev B.B., Ospanov E.A., Orazbayeva K.N., Kurmangazieva L.T. A hybrid method for the development of mathematical models of a chemical engineering system in ambiguous conditions. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2018, vol. 10, no. 6, pp. 748–758.
10. Orlovsky S.A. *Problemy prinyatiya resheniy pri nechetkoy iskhodnoy informatsii* [Decision-making problems with fuzzy initial information]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 325 p.
11. Rademaker M., Bernard B. Aggregation of monotone reciprocal relations with application to group decision making. *Fuzzy Sets and Systems*, 2018, vol. 184, pp. 29–51.
12. Biegler L.T., Lang Y.D., Lin W.J. Multi-scale optimization for process systems engineering. *Computers and Chemical Engineering*, 2016, no. 10, pp. 17–35.
13. Zhenpei Li, Jinfei Wang, Brook R., Easton R. Promoting data requirement for the oil & gas pipeline integrity management. *Oil Gas European Magazine*, 2017, vol. 132, pp. 167–193.
14. Dubois D. The role of fuzzy sets indecision sciences: old techniques and new directions. *Fuzzy Sets and Systems*, 2011, vol. 184, pp. 3–17.
15. Suleimenov B.A. *Intellektualnye i gibridnye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami* [Intelligent and hybrid process control systems]. Almaty, Pikula and K Publ., 2009. 304 p.
16. Ryzhov A.P. *Teoriya nechetkikh mnozhestv i ee prilozheniy* [The theory of fuzzy sets and its applications]. Moscow, Moscow State University Publ. House, 2017. 115 p.
17. Orazbayev B.B., Mukhambetkalieva A.K., Myrzasheva A.N. Decision problems for managing a technological object in a fuzzy environment and heuristic methods for solving them. *Bulletin of the Eurasian National University*, 2017, no. 4, pp. 142–147. In Rus.
18. Bogdanov R.M. A software package for modeling the operation of trunk pipelines. *Oil and gas business: electronic scientific journal*, 2014, no. 1. Available at: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Bogdanov/Bogdanov_4.pdf (accessed 1 August 2019).
19. Grebenyuk G.G. Mathematical modeling as a decision tool in the control of urban heat supply. *Automation and Remote Control*, 2006, vol. 67, no. 5, pp. 805–812.
20. Zыkov V.V. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsii protsessov sbora, podgotovki i transportirovki nefii i gaza* [Mathematical modeling and optimization of the processes of collection, preparation and transportation of oil and gas]. Tyumen, Nedra Publ., 1990. 327 p.
21. Baronets V.D., Grechikhin M.A. A model for representing the membership function in expert systems. *Automation and Remote Control*, 2017, vol. 53, no. 6, pp. 921–925.
22. Karpinski M., Korchenko A., Vikulov P., Kochan R., Balyk A., Kozak R. The etalon models of linguistic variables for sniffing-attack detection. *9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS 2017)*. Bucharest, Romania, September 21–23, 2017. pp. 258–264. DOI: 10.1109/IDAACS.2017.8095087
23. Orazbayev B.B., Ospanov E.A., Orazbayeva K.N., Serimbetov B.A. Multicriteria optimization in control of a chemical-technological system for production of benzene with fuzzy information. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 330, no. 7, pp. 182–194. In Rus.
24. Valiakhmetov R.I., Yamaliev V.U., Shubin S.S., Alferov A.V. Application of heuristic algorithms in analyzing data to solve the problem of detection of electric centrifugal pumping units. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 159–167. In Rus.
25. Pershin Yu. Pareto-optimal and lexicographic solutions of mixed-integer problems that are linear with respect to continuous variables. *Automation and Remote Control*, 1994, vol. 55, no. 2, pp. 263–270.
26. Czuprat O. Simulation method aids pigging operation in subsea waxy crude oil pipelines. *Oil Gas European Magazine*, 2018, vol. 2, pp. 200–223.
27. Bogdanov R.M., Lukin S.V. *Opredelenie ryada optimalnykh rezhimov raboty magistralnykh truboprovodov pri vybrannykh kriteriyakh optimalnosti* [Determination of a number of optimal modes of operation of trunk pipelines under selected optimality criteria]. Patent RF, no. 2011611173, 2011.
28. Zhapbasbaev U.K., Makhmotov E.S., Ramazanova G.I., Bekibaev T.T. Calculations for energy-saving modes for batching oil blends itrunk pipelines. *Pipeline Science and Technology*, 2018, vol. 2, no. 3, pp. 221–230.
29. Seleznev V.E. *Matematicheskoe modelirovanie truboprovodnykh setey i sistem: metody, modeli i algoritmy* [Mathematical modeling of pipeline networks and systems: methods, models and algorithms]. Moscow, MaxPress Publ., 2009. 695 p.
30. Mukhambetkalieva A.K. Problems of mathematical modeling of the technological complex of main oil pipelines and approaches to their solution. *Poisk*, 2006, no. 4. pp. 229–235. In Rus.
31. Grossmann I.E. Challenges in the application of mathematical programming in the enterprise-wide optimization of process industries. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2014, vol. 48, no. 5, pp. 500–517.

Received: 18 November 2020.

Information about the authors

Batyr B. Orazbayev, Dr. Sc, professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University.

Kulman N. Orazbayeva, Dr. Sc, professor, Kazakh University of Economics, Finance and International Trade.

Balbupe E. Utenova, Cand. Sc., associate professor, Atyrau University of Oil and Gas.

Ainur B. Shagayeva, senior lecturer, Atyrau University of Oil and Gas.

Botakoz R. Kassimova, Cand. Sc., associate professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University.