https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-10

BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 27.35.33

Б.Б. Оразбаев[1], А.Т. Кишубаева[2]*, К.Н. Оразбаева[3], Л.М. Абдибекова[3], Б.Е. Утенова[4]
[1]Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
Z01A3D7, Республика Казахстан, г. Астана, ул. К. Сатпаева, 2
[2]Торайгыров Университет,
S14P3K7, Республика Казахстан, г. Павлодар, улица Ломова, 64
[3]Esil university,
Z01A3D8, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Жубанова, 7
[4]Атырауский университет нефти и газа,
E01Y6P0, Республика Казахстан, г. Атырау, ул. Баймуханова 45,а
*e-mail: Altynai_999@mail.ru

ЛИНГВИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ВЫХОДОМ И КАЧЕСТВОМ НЕФТЯНОГО КОКСА

Аннотация: *В работе исследованы проблемы лингвистического моделирования и управления процессами производства качественного кокса в нечеткой среде на основе системы поддержки принятия решений, а также предложены подходы к их решению. Предложен метод синтеза лингвистических моделей сложных технологических систем с нечеткими входными и выходными параметрами, основанный на экспертных знаниях и на использовании приложения Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB. На основе предложенного метода, в виде системы нечеткого вывода, синтезированы лингвистические модели, оценивающие выход кокса и его качественные показатели в процессе замедленного коксования. Построены функции принадлежности входных и выходных параметров процесса замедленного коксования, а также 3D поверхности «входы-выходы», которые позволяют анализировать и принимать решения по управлению процессом производства качественного кокса. На основе синтезированных в данной работе лингвистических моделей, разработанной и опубликованной авторами модели ректификационной колонны установки замедленного коксования, а также эвристического метода принятия решений создана интеллектуализированная система поддержки принятия решений. Приведены и описаны основные интерфейсы созданной системы поддержки принятия решений, реализующие процессы моделирования и принятия решений для эффективного управления процессом производства кокса. Новизна и преимущества полученных результатов заключаются в их возможности моделирования и оптимизации процесса замедленного коксования, а также управления качеством производимого кокса в нечеткой среде. Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что они позволяют оперативно управлять процессом производства кокса в реальных условиях, характеризующихся неопределенностью и нечеткостью исходной информации.*

Ключевые слова: *лингвистические модели, нефтяной кокс, процесс замедленного коксования, реакторы коксования, принятия решений.*

Введение

Современные технологические установки нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) относятся к сложным технологическим системам, состоящим из множества взаимосвязанных агрегатов и характеризующихся высокой сложностью, наличием взаимосвязанных параметров и существенной неопределенностью исходной информации. Одним из ключевых технологических установок глубокой переработки нефти в НПЗ является установка замедленного коксования (УЗК), в которой производится качественный нефтяной кокс, являющийся ценным сырьем для электроники, космической техники, металлургии и электрохимической промышленности [1]. В настоящее время на мировом рынке спрос на качественный кокс интенсивно растет, что требует оптимального управления процессом производства качественного кокса, в условиях неопределенности. В этой связи решение проблем моделирования и принятия решений по оптимальному управлению процессом замедленного коксования в условиях неопределенности и нечеткости исходной информации стало весьма актуальной научно-практической задачей НПЗ [2].

©Б.Б. Оразбаев, А.Т. Кишубаева, К.Н. Оразбаева, Л.М. Абдибекова, Б.Е. Утенова, 2026

Некоторые важные параметры процесса замедленного коксования в производственных условиях непосредственно не измеряются. Эти параметры и показатели на практике оцениваются лицом, принимающим решения (ЛПР), которые принимают решение по управлению процессом, экспертами в лингвистической форме, например: «высокая летучесть», «среднее качество кокса», «низкое содержание золы» и т.д. Это делает использование классических методов моделирования не эффективным. В этой связи, для управления такими объектами активно стали развиваться методы интеллектуального моделирования и принятия решений, которые включают: нечеткую логику; лингвистические переменные и экспертные знания [3]. На основе этих методов создаются системы поддержки принятия решений (СППР), позволяющие эффективно управлять сложными процессами в условиях неопределенности и нечеткости данных. Использование лингвистических моделей в таких системах позволяет учитывать опыт и знания ЛПР, специалистов-экспертов, формализуя их в виде правил и логических зависимостей.

Приведем основные результаты литературного анализа по теме данного исследования. Ishibuchi и другие авторы в работе [4] разработали компактные лингвистические модели неформализуемых систем, на основе лингвистических информационных гранул. Проблемы лингвистического моделирования и многоцелевого проектирования лингвистических моделей в нечеткой среде исследованы авторами работ [5, 6]. Kickert в своем исследовании [7] анализировал особенности результатов лингвистического моделирования, а авторы в работе [8, 9] описали типы лингвистических моделей и их применение для решения лингвистических задач. Подходы к разработке лингвистических моделей установки каталитического крекинга на основе методов экспертной оценки исследованы в работе [10]. Однако в проанализированных работах, посвященных вопросам лингвистического моделирования, до сих пор не предложен метод синтеза лингвистических моделей с использованием инструментария нечеткой логики, содержащий конкретные этапы реализации. В связи с этим в данной работе предлагается и используется метод синтеза лингвистических моделей в нечеткой среде, базирующийся на основе экспертных знаний и инструментария Fuzzy Logic Toolbox графической системы MATLAB.

Для эффективного управления процессом производства кокса в нечеткой среде на основе лингвистических моделей необходимо создать СППР, позволяющую поддерживать ЛПР в процессе принятия решений по управлению выходом и качественными показателями производимого кокса. СППР представляет собой компьютерную систему, поддерживающую ЛПР, при моделировании режимов работы управляемого объекта и принятия обоснованного решения по управлению. Эти функции СППР реализуются на основе моделей управляемого объекта, методов принятия решений, базы данных и знаний, модуля логического вывода и интерфейса пользователя.

Общая структура и функциональные блоки СППР описаны в работе [11]. Авторы работ [12] исследовали вопросы применения СППР в промышленности, науке. Triantafyllou в своем исследовании [13] предложил подход к созданию СППР, базирующийся на основе деревьев решений. Sànchez-Marrè в работе [14] привел результаты исследования подходов к созданию интеллектуальных СППР на основе методов искусственного интеллекта. В проанализированных и других известных работах, посвященных созданию СППР, мало освещены вопросы разработки интеллектуализированных СППР (ИССПР) в условиях неопределенности, базирующихся на основе лингвистических моделей управляемого объекта и эвристических методов решения задач принятия решений. Это мотивировало необходимость проведения данного исследования, посвященного разработке ИСППР на основе лингвистических моделей процесса производства качественного кокса и эвристического метода, основанного на модификации принципа Парето оптимальности для нечеткости, который опубликован ранее нами в работе [15].

Процесс замедленного коксования характеризуется сложной нелинейной динамикой и неопределенностью из-за нечеткости параметров. В таких условиях классическая модель:

$$y_j = f(x_1, x_2, \ldots, x_n), j = \overline{1,m},$$

не всегда адекватно описывает исследуемые системы, так как функция f неизвестна и характеризуется неопределенность, нечеткостью.

В этих условиях для адекватного описания используется лингвистическое представление:

$$\tilde{Y} = \mathcal{F}(\tilde{X}),$$

где $\tilde{X} = \{\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \ldots, \tilde{x}_n\}$ – входные переменные; $\tilde{Y}$ –выходные параметры реакторов коксования: выход кокса и его качественные показатели; $\mathcal{F}$– нечеткое отображение.

Целью настоящего исследования является разработка метода синтеза лингвистических моделей объектов в нечеткой среде (на примере производства кокса), на основе которого создается ИСППР для управления выходом и качеством нефтяного кокса.

Условия и методы исследования

Объектом исследования являются реакторы коксования УЗК Атырауского НПЗ. Особенность условий проведения исследования заключается в том, что доступная информация для разработки моделей определения зависимости выхода и качества кокса от входных параметров объекта исследования является нечеткой, представляющей собой экспертные знания. Сбор нечеткой информации от ЛПР, специалистов-экспертов предметной области произведен на основе методов экспертных оценок [16]. Формализация, обработка и использование нечеткой информации, получаемой от экспертов, проведена с использованием методов теории нечетких множеств [2, 15, 17]. При проведении исследования разработки моделей, решения задач принятия решений и создании СППР также использованы теоретические сведения о процессах производства кокса, экспериментально-статистические данные, а также данные технологического регламента УЗК Атырауского НПЗ [18]. Кроме того, для проведения комплексного анализа взаимосвязанных параметров УЗК в работе использованы методы системного анализа интеллектуального анализа данных. Для синтеза разработки моделей плохоформализуемых систем в нечеткой среде с использованием инструментария Fuzzy Logic Toolbox нами предлагается и используется метод синтеза лингвистических моделей.

Методика исследования. Основными этапами предлагаемого метода синтеза лингвистических моделей плохоформализуемых процессов в нечеткой среде являются:

1. На основе методов экспертной оценки выбрать нечеткие входные, режимные параметры плохоформализуемых технологических систем, как УЗК $\tilde{x}_i, i = \overline{1,n}$, влияющих на нечеткие значения выхода продукции и их качественные показатели $\tilde{y}_j, j = \overline{1,m}$.

2. Определение и выбор термов терм-множества $T(X,Y)$, нечетко описывающих нечеткие значения $\tilde{x}_i$ и $\tilde{y}_j$, являющихся лингвистическими переменными: $\tilde{x}_i \in \tilde{A}_i \subset X$, $\tilde{y}_j \in \tilde{B}_j \subset Y$, где $\tilde{A}_i$ и $\tilde{B}_j$ – нечеткие множества, к которым принадлежат входные, выходные лингвистические переменные, X, Y – универсальные множества;

3. С использованием инструментария Fuzzy Logic Toolbox графической системы MATLAB построить функции принадлежностей входных, выходных лингвистических переменных $\mu_{\tilde{A}_i}(\tilde{x}_i)$, $\mu_{\tilde{B}_j}(\tilde{y}_j)$, оценивающих степени принадлежности $\tilde{x}_i$ и $\tilde{y}_j$ к выбранным термам, например в виде гауссово функции:

$$\mu_{\tilde{A}_i}(\tilde{x}_j) = \exp\left(-\frac{(\tilde{x}_j - c)^2}{2\sigma^2}\right), \quad \mu_{\tilde{B}_j}(\tilde{y}_j) = \exp\left(-\frac{(\tilde{y}_j - c)^2}{2\sigma^2}\right) \qquad (1)$$

где c – центр (среднее значение); σ – ширина (разброс); $\tilde{x}_j, \tilde{y}_j$ – входные, выходные лингвистические переменные.

4. На основе экспертных знаний, с помощью методов экспертной оценки, формировать базы нечетких правил и синтезировать лингвистические модели по формуле:

$$R_k: \text{ЕСЛИ } \tilde{x}_1 \in \tilde{A}_1 \text{ И/ИЛИ } \tilde{x}_2 \in \tilde{A}_2, \ldots, \text{И/ИЛИ } \tilde{x}_n \in \tilde{A}_n \; THEN \;\; \tilde{y}_j \in \tilde{B}_j, j = \overline{1,m}. \qquad (2)$$

$R_k, k = \overline{1,K}$ – правило с номером k, $K = T^n$ – общее количество полных нечетких правил, T – количество термов входных лингвистических переменных, n – количество входных, режимных параметров технологической системы.

В редакторе базы правил Fuzzy Logic Toolbox создать полную базу нечетких правил в виде системы нечеткого вывода.

5. На основе базы правил формализуются нечеткие отображения $\tilde{R}_{ij}$, описывающие нечеткие связи между входными $\tilde{x}_i, i = \overline{1,n}$ и выходными $\tilde{y}_j, j = \overline{1,m}$ лингвистическими переменными. Для удобства нечеткие отображения $\tilde{R}_{ij}$ следует формализовать через их функции принадлежности $\mu_{\tilde{R}_{ij}}(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j)$.

6. На основе композиционного правила вывода $\tilde{B}_j = \tilde{A}_i \circ \tilde{R}_{ij}$, где $\tilde{A}_i \subset X,\ \tilde{B}_j \subset Y$, а X, Y – универсальные множества, определенные на этапе 2 для каждого терма t из терм-множеств $T(X,Y)$ нечеткое отображение определить декартовым произведением соответствующие универсальные множества: $\tilde{R}_{ij}^t = \tilde{A}_i^t \times \tilde{B}_j^t$.

7. Для проведения расчетов на основе функций принадлежностей нечеткого отображения $\tilde{R}_{ij}$ построить матрицы нечетких отношений $\mu_{\tilde{R}_{ij}}(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j)$, которые в общем виде на основе операции пересечения записываются в виде:

$$\mu_{\tilde{R}_{ij}}^t(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j) = min\left[\mu_{\tilde{A}_i}^t(x_i), \mu_{\tilde{B}_j}^t(y_j)\right], i = \overline{1,n}, j = \overline{1,m}. \quad (3)$$

8. На основе композиционного правила вывода и матрицы нечетких отношений (3) определить значения функции принадлежностей выходных параметров по формуле:

$$\mu_{\tilde{B}_j}^t(y_j') = \max_{x_i \in X}\{\min[\mu_{\tilde{A}_i}(x_i^*), \mu_{R_{ij}}(\tilde{x}_i, y_j^M)]\}, \quad (4)$$

где x_i^* – нечетко оцененные экспертами значения входных, режимных параметров технологических систем.

Тогда искомое множество, к которому принадлежат текущие значения входных, режимных параметров объекта, определяются по формуле $\mu_{A_i}(x_i^*) = \max_i \mu_{A_i}(x_i)$, т. е. как множество, в котором значения входных, режимных параметров имеют максимальное значение функции принадлежности.

В окне Rule Viewer Fuzzy Logic Toolbox провести нечеткое моделирование различных режимов работы технологической системы, с целью поиска оптимального режима, и визуализировать результаты нечеткого логического вывода.

9. Для дефаззификации результатов, т. е. определения числовых значений выходных параметров y_j^M из множества нечетких решений можно применить метод центра тяжести. В случае строгой формы нормальной функции принадлежности выходного параметра числовое значение результата может быть определено по выражению: $y_j^M = \arg\max_{y_j'} \mu_{B_j}(y_j'), j = \overline{1,m}.$, т. е. аргумент максимального значения функции принадлежности выходных параметров.

10. Проверяется условие адекватности полученной модели: $\min \sum_{j=1}^m \left(y_j^M - y_j^E\right)^2 \le S_R$,

где y_j^M – дефазифицированные значения выходных параметров технологической системы; y_j^E – реальные значения выходных параметров, полученные экспериментальным путем на исследуемой технологической системы; S_R – заданный уровень адекватности. Значения y_j^M и y_j^E должны быть получены при одинаковых значениях $x_i^*, i = \overline{1,n}$.

При выполнении условия адекватности выводятся синтезированные лингвистические модели с необходимой адекватностью. Если условие не выполняется, то начиная с 3-го этапа начинается новая итерация синтеза более адекватных моделей.

В окне Surface Viewer Fuzzy Logic Toolbox построить 3D поверхность “входы-выход” для визуального анализа зависимостей выходных параметров технологической системы от ее входных параметров.

Для решения задачи принятия решений в нечеткой среде также используется предложенный авторами в работе [16] эвристический метод, разработанный путем модификации принципа Парето оптимальности для работы в нечеткой среде.

Результаты исследований

Лингвистические модели, оценивающие нечеткие значения выхода и основных качественных показателей кокса в зависимости от фаззифицированных значений входных параметров реакторов коксования синтезированы на основе предложенного выше метода разработки лингвистических моделей плохоформализуемых процессов в нечеткой среде.

1. На основе автоматизированного метода Дельфи выбраны следующие входные, режимные параметры реакторов коксования: $\tilde{x}_1 \in [20,25]$, т/ч – объем сырья; $\tilde{x}_2 \in [480,490]$,°С и $\tilde{x}_3 \in [5,10]$, кг/см^2 – соответственно температура и давление реактора коксования. Выходными параметрами реакторов коксования, характеризующими качество процесса замедленного коксования, являются: $\tilde{y}_1 \in [15{,}22]$, т/ч – выход кокса; $\tilde{y}_2 \in [0.3, 0.5]$, % – зольность кокса; $\tilde{y}_3 \in [7,12]$, % – летучесть кокса;

2. С участием лица, принимающего решение (ЛПР) и экспертов определены и выбраны следующие термы терм-множества $T(X,Y)$, описывающие нечеткие значения переменных $\tilde{x}_i$ и $\tilde{y}_j$, представленных в виде лингвистических переменных. Для входов:

$\tilde{x}_1$ – объем сырья: низкий (20-21.5) – НЗ; средний (21–24) – СР; высокий (23-25) – ВС;

$\tilde{x}_2$ –температура: низкая (480-483)–НЗ; средняя (482–487)–СР; высокая (486-490)–ВС;

$\tilde{x}_3$ – давление: низкое (5-6.5) – НЗ; среднее (6–8.5) – СР; высокое (8–10) – ВС.

Для выходов:

$\tilde{y}_1$– выход кокса: низкий (15-17) – НЗ; средний (16-20) – СР; высокий (19-22) – ВС;

$\tilde{y}_2$– зольность кокса: низкая (0.3-0.35) – НЗ; средняя (0.33-0.45) – СР; высокая (0.4-0.5) – ВС;

$\tilde{y}_3$– летучесть кокса: низкий (7-8.5) – НЗ; средний (8-10) – СР; высокий (9.5-12) – ВС;

Таким образом $\tilde{A}_i \in (\text{НЗ, СР, ВС})$; $\tilde{B}_j \in (\text{НЗ, СР, ВС}); i = \overline{1,3}, j = \overline{1,3}$, $X = [20-25;\ 480-490;\ 5-10]$, $Y = [15-22; 0.3-0.5; 7-12]$.

3. С использованием Fuzzy Logic Toolbox построены функции принадлежностей (ФП) входных и выходных лингвистических переменных $\mu_{\tilde{A}_i}(\tilde{x}_i)$, $\mu_{\tilde{B}_j}(\tilde{y}_j)$, характеризующие степень принадлежности $\tilde{x}_i$ и $\tilde{y}_j$ к выбранным термам по формуле (1). Полученные результаты приведены на рисунках 1-3 для входных и на рисунках 4-6 для выходных переменных.

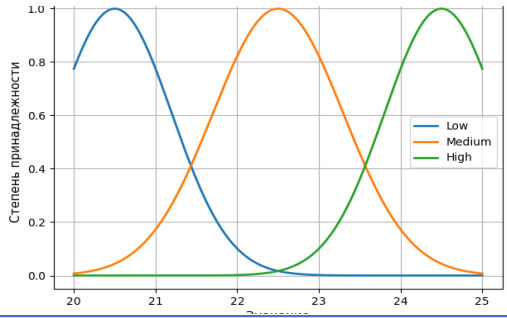


Рисунок 1 – ФП $\tilde{x}_1$ объема сырья

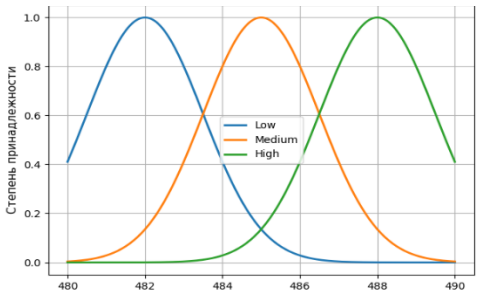


Рисунок 2 – ФП $\tilde{x}_2$ температура

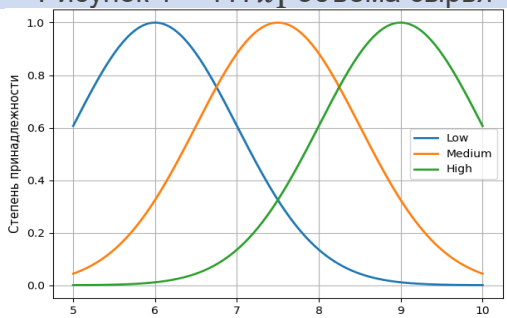


Рисунок 3 – ФП $\tilde{x}_3$ давление

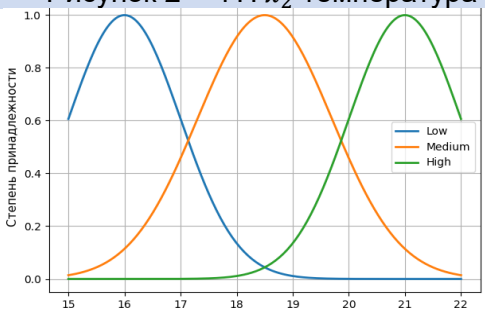


Рисунок 4 – ФП $\tilde{y}_1$ выход кокса

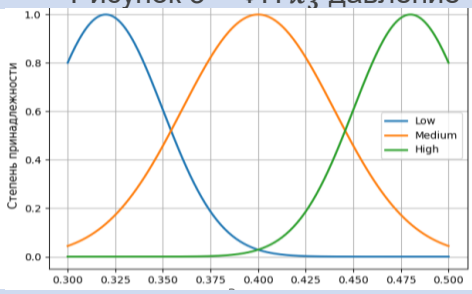


Рисунок 5 – ФП $\tilde{y}_2$ зольность кокса

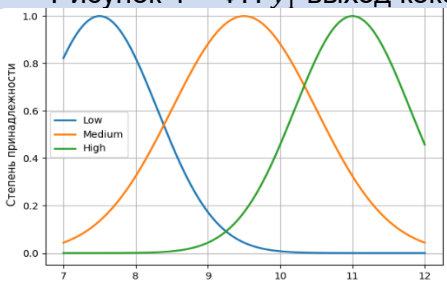


Рисунок 6 – ФП $\tilde{y}_3$ летучесть кокса

4. На основе экспертных знаний сформирована полная база нечетких правил из $3^3 = 27$ правил:

$\boldsymbol{R_1}$: IF $\tilde{\boldsymbol{x}}_1 = \text{НЗ}, \tilde{\boldsymbol{x}}_2 = \text{НЗ}, \tilde{\boldsymbol{x}}_3 = \text{НЗ},$ $\boldsymbol{R_{10}}$: IF $\tilde{\boldsymbol{x}}_1 = \text{СР}, \tilde{\boldsymbol{x}}_2 = \text{НЗ}, \tilde{\boldsymbol{x}}_3 = \text{НЗ},$ $\boldsymbol{R_{19}}$: IF $\tilde{\boldsymbol{x}}_1 = \text{ВС}, \tilde{\boldsymbol{x}}_2 = \text{НЗ}, \tilde{\boldsymbol{x}}_3 = \text{НЗ},$

THEN $\tilde{y}_1 = \text{НЗ}, \tilde{y}_2 = \text{НЗ}, \tilde{y}_3 = \text{ВС}$;	THEN $\tilde{y}_1 = \text{НЗ}, \tilde{y}_2 = \text{НЗ}, \tilde{y}_3 = \text{ВС}$;	THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{ВС}$;
R_2: IF $\tilde{x}_1 = \text{НЗ}, \tilde{x}_2 = \text{НЗ}, \tilde{x}_3 = \text{СР}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{НЗ}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{ВС}$;	R_{11}: IF $\tilde{x}_1 = \text{СР}, \tilde{x}_2 = \text{НЗ}, \tilde{x}_3 = \text{СР}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{ВС}$;	R_{20}: IF $\tilde{x}_1 = \text{ВС}, \tilde{x}_2 = \text{НЗ}, \tilde{x}_3 = \text{СР}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{СР}$;
R_3: IF $\tilde{x}_1 = \text{НЗ}, \tilde{x}_2 = \text{НЗ}, \tilde{x}_3 = \text{ВС}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{НЗ}, \tilde{y}_3 = \text{СР}$;	R_{12}: IF $\tilde{x}_1 = \text{СР}, \tilde{x}_2 = \text{НЗ}, \tilde{x}_3 = \text{ВС}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{ВС}, \tilde{y}_3 = \text{СР}$;	R_{21}: IF $\tilde{x}_1 = \text{ВС}, \tilde{x}_2 = \text{НЗ}, \tilde{x}_3 = \text{ВС}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{НЗ}, \tilde{y}_2 = \text{ВС}, \tilde{y}_3 = \text{СР}$;
R_4: IF $\tilde{x}_1 = \text{НЗ}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{НЗ}$ THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{НЗ}, \tilde{y}_3 = \text{СР}$;	R_{13}: IF $\tilde{x}_1 = \text{СР}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{НЗ}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{НЗ}, \tilde{y}_3 = \text{СР}$;	R_{22}: IF $\tilde{x}_1 = \text{ВС}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{НЗ}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{СР}$;
R_5: IF $\tilde{x}_1 = \text{НЗ}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{СР}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;	R_{14}: IF $\tilde{x}_1 = \text{СР}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{СР}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{СР}$;	R_{23}: IF $\tilde{x}_1 = \text{ВС}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{СР}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{ВС}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;
R_6: IF $\tilde{x}_1 = \text{НЗ}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{ВС}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{НЗ}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;	R_{15}: IF $\tilde{x}_1 = \text{СР}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{ВС}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{ВС}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;	R_{24}: IF $\tilde{x}_1 = \text{ВС}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{ВС}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{ВС}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;
R_7: IF $\tilde{x}_1 = \text{НЗ}, \tilde{x}_2 = \text{ВС}, \tilde{x}_3 = \text{НЗ}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;	R_{16}: IF $\tilde{x}_1 = \text{СР}, \tilde{x}_2 = \text{ВС}, \tilde{x}_3 = \text{НЗ}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{НЗ}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;	R_{25}: IF $\tilde{x}_1 = \text{ВС}, \tilde{x}_2 = \text{ВС}, \tilde{x}_3 = \text{НЗ}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;
R_8: IF $\tilde{x}_1 = \text{НЗ}, \tilde{x}_2 = \text{ВС}, \tilde{x}_3 = \text{СР}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;	R_{17}: IF $\tilde{x}_1 = \text{СР}, \tilde{x}_2 = \text{ВС}, \tilde{x}_3 = \text{СР}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{СР}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;	R_{26}: IF $\tilde{x}_1 = \text{ВС}, \tilde{x}_2 = \text{ВС}, \tilde{x}_3 = \text{СР}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{ВС}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;
R_9: IF $x_1 = \text{НЗ}, x_2 = \text{ВС}, x_3 = \text{ВС}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{СР}, \tilde{y}_2 = \text{ВС}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;	R_{18}: IF $\tilde{x}_1 = \text{СР}, \tilde{x}_2 = \text{ВС}, \tilde{x}_3 = \text{ВС}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{ВС}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$;	R_{27}: IF $\tilde{x}_1 = \text{ВС}, \tilde{x}_2 = \text{СР}, \tilde{x}_3 = \text{ВС}$, THEN $\tilde{y}_1 = \text{ВС}, \tilde{y}_2 = \text{ВС}, \tilde{y}_3 = \text{НЗ}$.

Таким образом, лингвистические модели имеют стандартную форму Мамдани и сформированы по общей формуле:

$$R_k: \text{ЕСЛИ } \tilde{x}_1 \in \tilde{A}_1 \text{ И } \tilde{x}_2 \in \tilde{A}_2 \text{ И } \tilde{x}_3 \in \tilde{A}_3 \, TO \; y_1 = B_1^k, y_2 = B_2^k, y_3 = B_3^k, k = \overline{1,27}. \quad (5)$$

В редакторе базы правил Fuzzy Logic Toolbox сформированная полная база нечетких правил создана в виде системы нечеткого вывода.

Детализируем методику синтеза нечеткой модели.

Тип системы нечеткого вывода. Нечеткие модели оценки выхода и основных качественных показателей кокса разработаны на основе аппарата нечеткой логики с использованием системы нечеткого вывода Мамдани, реализованной в среде MATLAB Fuzzy Logic Toolbox. Выбор системы Мамдани обусловлен тем, что она обеспечивает наиболее естественное представление экспертных знаний в виде лингвистических правил типа «ЕСЛИ–ТО», хорошо интерпретируется специалистами-технологами и широко применяется при моделировании сложных плохоформализуемых технологических процессов.

Параметры функции принадлежности. При построении функций принадлежности гауссового типа для термов, описывающих нечеткие входные и выходные параметры, их параметры определяются следующим образом:

c – центр, соответствующий максимальному значению лингвистического терма, на основе экспертной информации, операторы-технологи определили максимальное числовое значение параметров процесса, соответствующее каждому терму;

σ – ширина, определяющая степень перекрытия соседних функций принадлежности, по формуле $\sigma = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{m}$, где $x_{max}, x_{\min}$ – соответственно максимальное и минимальное

значение каждого параметра; m – количество термов, нечетко описывающие каждый параметр, в нашем случае $m = 3$.

Способ дефаззификации. Дефаззификация, т.е. преобразование результирующего нечеткого множества $y_j, j = \overline{1,3}$ в четкие числовые значения, выполнена методом центра тяжести (Centroid), который является стандартным методом дефаззификации в системах Мамдани и обеспечивает получение устойчивых и физически интерпретируемых результатов. При этом четкое значение выходной переменной вычислялось по выражению: $y_j^* = \frac{\int y_j \mu(y_j)\, dy_j}{\int \mu(y_j)\, dy_j}$.

Принципы формирования базы правил. База знаний сформирована совместно с экспертами-технологами на основе опыта эксплуатации УЗК, физико-химических закономерностей процесса коксования и анализа производственных данных. Так как каждая из трех входных переменных описывается тремя лингвистическими термами, полная база содержит $N = 3^3 = 27$, что соответствует полной комбинации всех возможных состояний процесса.

База правил формировалась совместно с операторами-технологами УЗК по следующим принципам:

– увеличение температуры способствует росту выхода кокса;

– чрезмерное давление ухудшает качество кокса;

– увеличение подачи сырья повышает производительность лишь до определенного предела;

– оптимальные значения температуры и давления обеспечивают минимальную зольность и летучесть кокса;

– каждое правило отражает реальные технологические закономерности процесса замедленного коксования.

Обоснование выбранных диапазонов входных и выходных переменных. На основе автоматизированного метода Дельфи с участием операторов-технологов УЗК были определены наиболее информативные входные параметры, определяющие качество работы реакторов коксования. Указанные диапазоны изменения входных и выходных параметров определены с учетом технологического режима работы УЗК и согласованы с действующими требованиями и нормативами УЗК Атырауского НПЗ.

Формирование экспертной базы правил производилось на основе автоматизированного метода Дельфи, который представляет собой метод сбора и обработки экспертных оценок, в которой привычные итерации анонимного анкетирования проводятся через специализированное программное обеспечение и возможности интернет связи. При этом использование IT технологии в расчете и анализе данных, исключает проблему конформизма экспертов, обеспечивает математическую точность. В экспертной оценки участвовали 8 экспертов (4 опытных операторы-технологи, управляющие режимами работы УЗК, 2 специалиста заводской лаборатории, начальник УЗК и 1 ученый-специалист, занимающийся моделированием и оптимизацией процесс замедленного коксования). Согласованность экспертных знаний в каждом туре экспертной оценки проверялась путем автоматизированного расчета коэффициента конкордации Кендалла. Согласованность мнений экспертов достигнута после 6-го тура. При этом рассчитанный коэффициент конкордации, оценивающий согласованность мнений экспертов, составил 0.97.

5. На основе базы правил построены нечеткие отображения $\tilde{R}_{ij}$, описывающие нечеткие связи между входными $\tilde{x}_i, i = \overline{1,3}$ и выходными $\tilde{y}_j, j = \overline{1,3}$ лингвистическими переменными. Формализация нечетких отображений выполнена с использованием функций принадлежности $\mu_{\tilde{R}_{ij}}(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j)$:

6. На основе композиционного правила вывода $\tilde{B}_j = \tilde{A}_i \circ \tilde{R}_{ij}$, где $\tilde{A}_i \subset X$, $\tilde{B}_j \subset Y$, а X, Y – универсальные множества, определенные на этапе 2 для каждого терма $t = \overline{1,3}$ из терм-множеств $T(X, Y)$ нечеткое отображение определено декартовым произведением соответствующих универсальных множеств $\tilde{R}_{ij}^t = \tilde{A}_i^t \times \tilde{B}_j^t$.

7. Для проведения расчетов на основе функций принадлежностей нечеткого отображения $\tilde{R}_{ij}$ построена матрица нечетких отношений $\mu_{\tilde{R}_{ij}}(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j)$, которая в общем виде на основе операции пересечения записывается в виде:

$$\mu^t_{\tilde{R}_{ij}}(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j) = min\left[\mu^t_{\tilde{A}_i}(x_i), \mu^t_{\tilde{B}_j}(y_j)\right], t = \overline{1,3}, i = \overline{1,3}, j = \overline{1,3}. \quad (5)$$

8. На основе композиционного правила вывода и матрицы нечетких отношений (5) определены значения функций принадлежностей выходных параметров по формуле (4).

Затем в окне Rule Viewer Fuzzy Logic Toolbox проведено нечеткое моделирование различных режимов работы и определены оптимальные режимы работы реакторов коксования с учетом плана производства и рыночного спроса на объём и на качество нефтяного кокса.

9. Дефаззификация результатов, из множества нечетких решений реализована в Fuzzy Logic Toolbox методом центра тяжести.

10. На основе критерия оценки адекватности проверен и обеспечен необходимый уровень адекватности модельных результатов с их реальными значения не выше 3%.

Результаты моделирования. В таблице 1 приведены результаты сравнения дефазифицированных модельных и реальных значений выхода кокса, его зольности и летучести при одинаковых значениях входных параметров реакторов коксования.

Таблица 1 – Сравнение средних модельных и реальных значений выходных параметров реакторов коксования от их входных параметров

№ п/п	Наименование выходных параметров	Значения, полученные на основе модели	Реальные значения, полученные на исследуемой УЗК
1	y_1 – выход кокса, т/ч	21.500	20,950
2	y_2 – зольность кокса, %	0.320	0,328
3	y_3 – летучесть кокса; %	7.500	7.650

Примечание: Сравниваемые значения выходных параметров реакторов коксования получены при одинаковых значениях их входных параметров

Методика расчета ошибки. Для каждого выходного параметра рассчитывались:

1. Абсолютная ошибка: $\Delta_i = | y_i^{\text{мод}} - y_i^{\text{реал}} |$, где $y_i^{\text{мод}}$ – значение выходного параметра, полученное по модели; $y_i^{\text{реал}}$ – реальные значения выходного параметра УЗК.

2. Относительная ошибка $\delta_i = \frac{|y_i^{\text{мод}} - y_i^{\text{реал}}|}{y_i^{\text{реал}}} \times 100\%$, показывающая насколько результат моделирования отличается от фактического значения в процентах.

Для оценки адекватности разработанной нечеткой модели на основе данных таблицы 1 проведено сравнение расчетных значений выходных параметров реакторов коксования с экспериментальными данными, полученными на УЗК Атырауского НПЗ при одинаковых значениях входных технологических параметров. Точность моделирования оценивалась по абсолютной и относительной ошибкам. Абсолютная ошибка определялась как модуль разности между модельным и реальным значениями выходного параметра, а относительная ошибка – как отношение абсолютной ошибки к экспериментальному значению, выраженное в процентах. Полученные результаты показали, что относительная ошибка определения выхода кокса составила 2,63 %, зольности кокса – 2,44%, летучести кокса – 1,96%.

3. Средняя относительная ошибка модели составила $\delta_{\text{ср}} = \frac{2.63+2.44+1.96}{3} = 2.34\%$, что свидетельствует о достаточной точности и адекватности разработанной нечеткой модели для прогнозирования качественных показателей процесса замедленного коксования.

В окне Surface Viewer Fuzzy Logic Toolbox построены 3D поверхности “входы-выход” по результатам моделирования для визуального анализа зависимостей выходных параметров технологической системы от ее входных параметров. Построенные 3D поверхности на основе формированной базы правил приведены на рисунке 7.

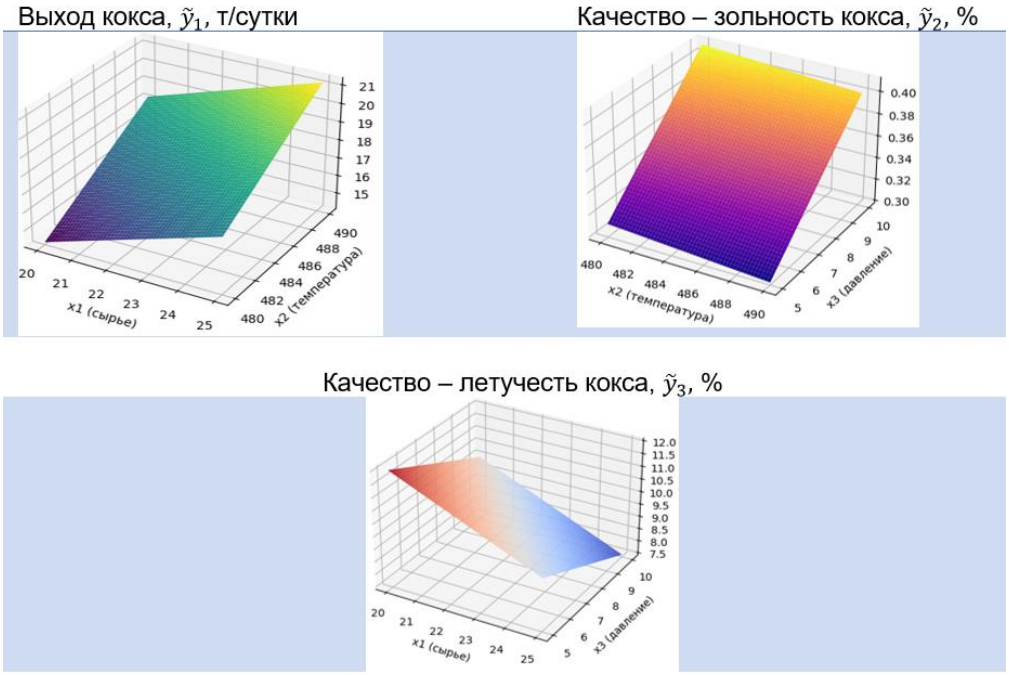


Рисунок 7 – Поверхность “входы-выходы” в окне Surface Viewer Fuzzy Logic Toolbox

Описание программной реализации СППР. Главное окно ИСППР для управления процессом производства нефтяного кокса содержит горизонтальную строку меню, расположенную в верхней части интерфейса систем. В строке меню представлены следующие разделы:

– «Схемы», предназначено для выбора общей технологической схемы УЗК или схем ее основных агрегатов;

– «Модели», содержит подменю «Управляющие воздействия»; «Расчет и просмотр результатов» и «Принятие решений»;

– «Протокол», предназначенный для заполнения и ведения режимного листа УЗК;

– «Аварийные ситуации», предназначены для просмотра возможных ситуаций на УЗК;

– «Нормы», позволяют вывести на экран монитора различные нормы производства;

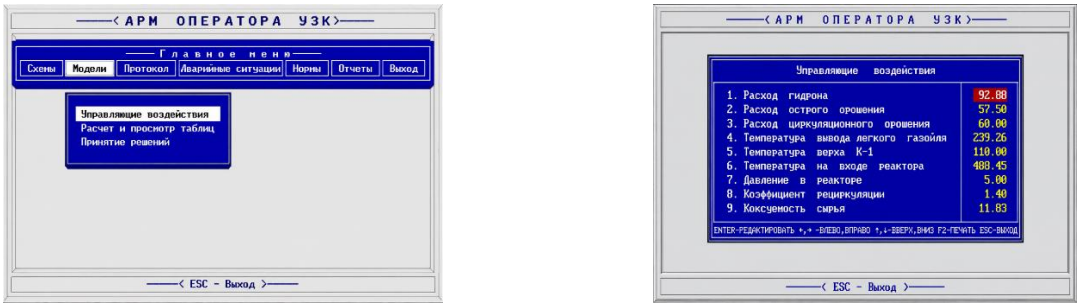
– «Отчеты», позволяют вывести на экран монитора и принтер отчет о переработке сырья и полученных продуктов по утвержденной форме.

В подменю «Модели» программно реализован разработанный пакет моделей УЗК, включающий модели печей первичного и вторичного подогрева П-1–П-4 основной ректификационной колонны К-1 УЗК и модели реакторов коксования Р-1 – Р-4. Здесь можно выбрать значения управляющих воздействий, моделировать режимы работы УЗК и вывести результаты моделирования (рисунок 8 а).

При выборе пункта «Управляющие воздействия» из меню «Модели» открывается наименование входных, режимных параметров, используемых в качестве управляющих воздействий для управления режимами работы УЗК и заданные их средние значения. Здесь предусмотрена возможность редактирования их значений (рис. 8 b).

После выбора необходимых значений управляющих воздействий нажимая на пункт «Расчет и просмотр таблиц» можно вывести на экран результаты моделирования в виде таблиц материального баланса и теплового баланса (рис. 9 а).

Пункт «Принятие решений» меню «Модели» на основе моделей позволяет оказать поддержку процессов подготовки и принятия решений. В данном пункте в диалоговом режиме «ЛПР-компьютер» решается задача принятия решений в нечеткой среде по управлению процессом производства качественного кокса. При нажатии на «Принятие решений» на экран монитора выводится интерфейс «Система принятия решений», предназначенный для поддержки процесса принятия решений для управления процессом производства кокса и других продуктов УЗК (рис. 10а).



a) b)

a) для моделирования режимов работы УЗК, просмотра результатов моделирования и выбора процедуры принятия решений на основе моделей и b) для просмотра, изменения значений управляющих воздействий

Рисунок 8 – Интерфейсы СППР



Рисунок 9 – Интерфейс АРМ оператора УЗК для вывода материального баланса УЗК по результатам моделирования

На рисунке 10 приведен интерфейс СППР по контролю и управлению выходом и качественными показателями кокса, определяемые на основе синтезированных лингвистических моделей.



Рисунок 10 – Интерфейсы СППР для управления выходом, летучестью и зольностью кокса

Обсуждение результатов исследования

Предложенный метод разработки лингвистических моделей плохоформализуемых процессов в нечеткой среде позволяет на основе экспертных знаний формировать лингвистические модели в виде полной базы нечетких правил, представляющих собой систему нечеткого вывода.

Основные технологические закономерности сформированной базы правил заключаются в том, что:

– повышение температуры приводит к увеличению выхода кокса и снижению содержания летучих веществ, тем самым улучшая его качество;

– при повышении давления зольность кокса увеличивается, т.е. его качество ухудшается;

– увеличение сырья приводит к повышению выхода кокса, а ее качество ухудшается.

На основе анализа построенной 3D поверхности «входы-выходы» можно отметить, что

– выход кокса растет при повышении температуры и при росте объема сырья и немного падает при повышении давления;

– зольность кокса увеличивается при повышении давления, а при повышении температуры зольность уменьшается;

– летучесть кокса снижается при росте температуры и при увеличении объема сырья,

Результаты исследования подтверждают высокую эффективность применения лингвистических моделей для управления процессами производства кокса. Основными преимуществами лингвистических моделей являются:

– возможность работы в условиях неопределенности и нечеткости данных за счет учета нечеткой информации, субъективной оценки, представляющей собой знания, опыт и интуицию ЛПР и экспертов;

– интеграция экспертных знаний на основе продукционной модели представления знании структурой «ЕСЛИ … –ТО …..» делает модели интерпретируемыми.

– гибкость и адаптивность лингвистических моделей, так как они могут легко модифицироваться при изменении условий.

К числу ограничений лингвистических моделей относятся: зависимость от качества экспертных оценок; сложность настройки функций принадлежности и ограниченная универсальность моделей.

Для оптимизации режимов работы УЗК, например, для максимизации выхода нефтяного кокса, необходимо с помощью клавиш ↑ или ↓ переместить выделение (красную рамку) к диаграмме «Кокс», после чего нажать клавишу X (максимизация) (рис. 10). В этом случае с использованием соответствующего алгоритма максимизируется данный критерий, при этом ограничения по другим критериям и показателям контролируются.

Заключение

Исследованы основные проблемы синтеза лингвистических моделей и создания системы принятия решений по управлению выходом и качеством нефтяного кокса в условиях неопределенности, а также предложены подходы к их решению. В результате проведенных исследований получены следующие основные результаты:

– на основе системного подхода, методов экспертной оценки и теорий нечетких множеств предложен метода синтеза лингвистических моделей плохоформализуемых процессов в нечеткой среде с использованием инструментария Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB;

– с использованием предложенного метода синтезированы лингвистические модели оценки выхода и качественных показателей кокса в нечеткой среде в виде полной базы нечетких правил;

– на основе синтезированных моделей построены функции принадлежности входных, выходных параметров реакторов коксования УЗК и поверхности «входы-выходы», визуализирующие зависимость выхода и качественных показателей кокса от входных, режимных параметров реакторов коксования;

– на основе разработанных моделей, эвристических методов решения задач принятия решений создана СППР для управления процессом производства качественного кокса, приведены и кратко описаны ее основные интерфейсы, позволяющие моделировать и принимать решения по управлению процессом производства кокса.

Можно заключить, что лингвистические модели могут быть эффективным инструментом для описания сложных технологических процессов в условиях неопределенности, а использование методов экспертных оценок и нечеткой логики позволяет формализовать экспертные знания и повысить точность управления в нечеткой среде. Предложенные методы обеспечивают эффективное решение задач управления процессом производства качественного кокса.

Список литературы

1. Карабасова Н.А. Анализ и прогнозирование процесса коксования нефтяных остатков Атырауского YGP / Н.А. Карабасова, Ф.Б. Кайрлиева // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. – 2025. – Том 7, № 2. – P. 96-105. https://doi.org/10.54859/kjogi108825.
2. Methods for Modeling and Optimizing the Delayed Coking Process in a Fuzzy Environment / B. Orazbayev et al // Processes. – 2023. – № 11, vol. 450. – P. 1-19. https://doi.org/10.3390/pr11020450.
3. Witt A. Linguistic Modeling of Information and Markup Languages. In Contributions to Language Technology / A. Witt, D. Metzing // Springer Dordrecht. – 2020. – P. 33-48. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3331-4.
4. Ishibuchi H. Design of Compact Linguistic Models. In: Classification and Modeling with Linguistic Information Granules / H. Ishibuchi, T. Nakashima, M. Nii // Advanced Information Processing. Springer, Berlin, Heidelberg. – 2020. – P. 181-198. https://doi.org/10.1007/3-540-26875-8_9.
5. Favre J.M. Modeling the Linguistic Architecture of Software Products / J.M. Favre, Lämmel R., Varanovich A. // Model Driven Engineering Languages and Systems. MODELS 2012. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, Heidelberg. – 2022. – Vol 7590. – P. 151-167. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33666-9_11.
6. Ishibuchi H. Multi-Objective Design of Linguistic Models. In: Classification and Modeling with Linguistic Information Granules. Advanced Information Processing / H. Ishibuchi // Springer, Berlin, Heidelberg. – 2021. https://doi.org/10.1007/3-540-26875-8_6.
7. Kickert W.J.M. Towards an Analysis of Linguistic Modelling / W.J.M. Kickert et al // Current Topics in Cybernetics and Systems. Springer, Berlin, Heidelberg. – 2022. – P. 369-371. https://doi.org/10.1007/978-3-642-93104-8_232.
8. Lukach M.O. Types of linguistic models and their application to solving linguistic tasks / M.O. Lukach // Lviv. – 2023. – 47 p.
9. Поликарпова О.Н. О типах лингвистического моделирования / О.Н. Поликарпова // Вестник Казанского гос. энергетического университета. – 2025. – Том 57, № 3. – С. 45-67.
10. Development and Synthesis of Linguistic Models for Catalytic Cracking Unit in a Fuzzy Environment / B. Orazbayev et al // Processes. – 2024. – № 12. – P. 1-22. https://doi.org/10.3390/pr12081543.
11. Садовникова Н.П. Системы поддержки принятия решений / Н.П. Садовникова, Д.С. Парыгин, М.В. Щербаков – ВолгГТУ. –Волгоград, 2021. –108 с.
12. Gupta N. Decision Support Systems for Industrial and Scientific Applications / N. Gupta, J.D.D. Roman // Springer Cham. – 2026. – 308 p. https://doi.org/10.1007/978-3-031-89700-9.
13. Decision Support Systems and Decision Trees: An Overview / S.A. Triantafyllou // Artificial Intelligence Algorithm Design for Systems. CSOC 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham. – 2024. – Vol. 1120. – P. 51-59. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70518-2_5.
14. Sànchez-Marrè M. Intelligent Decision Support Systems / M. Sànchez-Marrè // Springer Int. Publ. – 2022. – 457 p.
15. Decision Making for Control of the Gasoline Fraction Hydrotreating Process in a Fuzzy Environment / B. Orazbayev et al // Processes. – 2024. – № 12. – P. 669. https:// doi.org/10.3390/pr12040669.
16. Krivonogov A.A. Application of the Method of Expert Assessments in Determining the Level of Criticality of the Information Security Vulnerability of Smart Contracts / A.A. Krivonogov, Y.N. Philippovich, S.A. Kesel // Software Engineering Application in Systems Design. CoMeSySo 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham. – 2023. – Vol 596. – P. 512-530. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21435-6_45.
17. Li F. Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Inference Systems / F. Li, Q. Shen // In: Fuzzy Rule-Based Inference. Springer, Singapore. – 2024. – P. 1-15. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0491-0_1.
18. Сулейменов Е.Т. Технологический регламент установки замедленного коксования / Е.Т. Сулейменов, Ж.Н. Тулеуов. – Атырау: Изд-во Атырауского университета нефти и газа. – 2023, 118 с.

References

1. Karabasova N.A. Analiz i prognozirovanie protsessa koksovaniya neftyanykh ostatkov Atyrauskogo YGP / N.A. Karabasova, F.B. Kairlieva // Vestnik neftegazovoi otrasli Kazakhstana. – 2025. – Tom 7, № 2. – R. 96-105. https://doi.org/10.54859/kjogi108825. (In Russian).
2. Methods for Modeling and Optimizing the Delayed Coking Process in a Fuzzy Environment / B. Orazbayev et al // Processes. – 2023. – № 11, vol. 450. – R. 1-19. https://doi.org/10.3390/pr11020450. (In English).
3. Witt A. Linguistic Modeling of Information and Markup Languages. In Contributions to Language Technology / A. Witt, D. Metzing // Springer Dordrecht. – 2020. – R. 33-48. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3331-4. (In English).
4. Ishibuchi H. Design of Compact Linguistic Models. In: Classification and Modeling with Linguistic Information Granules / H. Ishibuchi, T. Nakashima, M. Nii // Advanced Information Processing. Springer, Berlin, Heidelberg. – 2020. – R. 181-198. https://doi.org/10.1007/3-540-26875-8_9. (In English).
5. Favre J.M. Modeling the Linguistic Architecture of Software Products / J.M. Favre, Lämmel R., Varanovich A. // Model Driven Engineering Languages and Systems. MODELS 2012. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, Heidelberg. – 2022. – Vol 7590. – R. 151-167. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33666-9_11. (In English).
6. Ishibuchi H. Multi-Objective Design of Linguistic Models. In: Classification and Modeling with Linguistic Information Granules. Advanced Information Processing / H. Ishibuchi // Springer, Berlin, Heidelberg. – 2021. https://doi.org/10.1007/3-540-26875-8_6. (In English).
7. Kickert W.J.M. Towards an Analysis of Linguistic Modelling / W.J.M. Kickert et al // Current Topics in Cybernetics and Systems. Springer, Berlin, Heidelberg. – 2022. – R. 369-371. https://doi.org/10.1007/978-3-642-93104-8_232. (In English).
8. Lukach M.O. Types of linguistic models and their application to solving linguistic tasks / M.O. Lukach // Lviv. – 2023. – 47 p. (In English).
9. Polikarpova O.N. O tipakh lingvisticheskogo modelirovaniya / O.N. Polikarpova // Vestnik Kazanskogo gos. ehnergeticheskogo universiteta. – 2025. – Tom 57, № 3. – S. 45-67. (In Russian).
10. Development and Synthesis of Linguistic Models for Catalytic Cracking Unit in a Fuzzy Environment / B. Orazbayev et al // Processes. – 2024. – № 12. – R. 1-22. https://doi.org/10.3390/pr12081543. (In English).
11. Sadovnikova N.P. Sistemy podderzhki prinyatiya reshenii / N.P. Sadovnikova, D.S. Parygin, M.V. Shcherbakov – VolgGTU. –Volgograd, 2021. –108 s. (In Russian).
12. Gupta N. Decision Support Systems for Industrial and Scientific Applications / N. Gupta, J.D.D. Roman // Springer Cham. – 2026. – 308 p. https://doi.org/10.1007/978-3-031-89700-9. (In English).
13. Decision Support Systems and Decision Trees: An Overview / S.A. Triantafyllou // Artificial Intelligence Algorithm Design for Systems. CSOC 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham. – 2024. – Vol. 1120. – R. 51-59. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70518-2_5. (In English).
14. Sànchez-Marrè M. Intelligent Decision Support Systems / M. Sànchez-Marrè // Springer Int. Publ. – 2022. – 457 p. (In English).
15. Decision Making for Control of the Gasoline Fraction Hydrotreating Process in a Fuzzy Environment / B. Orazbayev et al // Processes. – 2024. – № 12. – R. 669. https:// doi.org/10.3390/pr12040669. (In English).
16. Krivonogov A.A. Application of the Method of Expert Assessments in Determining the Level of Criticality of the Information Security Vulnerability of Smart Contracts / A.A. Krivonogov, Y.N. Philippovich, S.A. Kesel // Software Engineering Application in Systems Design. CoMeSySo 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham. – 2023. – Vol 596. – R. 512-530. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21435-6_45. (In English).
17. Li F. Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Inference Systems / F. Li, Q. Shen // In: Fuzzy Rule-Based Inference. Springer, Singapore. – 2024. – R. 1-15. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0491-0_1. (In English).
18. Suleimenov E.T. Tekhnologicheskii reglament ustanovki zamedlennogo koksovaniya / E.T. Suleimenov, Zh.N. Tuleuov. – Atyrau: Izd-vo Atyrauskogo universiteta nefti i gaza. – 2023, 118 s. (In Russian).

Б.Б. Оразбаев[1], А.Т. Кишубаева[2]*, К.Н. Оразбаева[3], Л.М. Абдибекова[3], Б.Е. Утенова[4]
[1]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Z01A3D7, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қ. Сатпаев к-сі, 2
[2]Торайғыров Университет,
S14P3K7, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ., Ломов к-сі, 64
[3]Esil university,
Z01A3D8, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Жубанов к-сі, 7
[4]Атырау мұнай және газ университеті,
E01Y6P0, Қазақстан Республикасы, Атырау қ., Баймуханов к-сі, 45,а
*e-mail: Altynai_999@mail.ru

МҰНАЙ КОКСЫ ШЫҒЫМЫ МЕН САПАСЫН БАСҚАРУҒА АРНАЛҒАН ЛИНГВИСТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕР МЕН ШЕШІМ ҚАБЫЛДАУДЫ ҚОЛДАУ ЖҮЙЕСІ

Мақалада шешім қабылдауды қолдау жүйесіне негізделген айқын емес ортада жоғары сапалы кокс өндіру процестерін лингвистикалық модельдеу және басқару мәселелері қарастырылады және оларды шешу тәсілдері ұсынылады. Эксперттік білімге және MATLAB жүйесінің Fuzzy Logic Toolbox қосымшасын пайдалануға негізделген, айқын емес кіріс және шығыс параметрлері бар күрделі технологиялық жүйелердің лингвистикалық модельдерін синтездеу тәсілі ұсынылған. Ұсынылған тәсіл негізінде, айқын емес қорытынды жүйесі түрінде, баяу кокстеу процесінде кокс шығымын және оның сапа көрсеткіштерін бағалау үшін лингвистикалық модельдер синтезделді. Жоғары сапалы кокс өндіру процесін басқару бойынша талдау және шешім қабылдауға мүмкіндік беретін баяу кокстеу процесінің кіріс және шығыс параметрлерінің тиістілік функциялары және 3D кіріс-шығыс беттері құрылды. Осы жұмыста синтезделген лингвистикалық модельдерге, авторлар әзірлеген және жариялаған баяу кокстеу қондырғысының ректификациялық колоннасы модельдерінің және шешім қабылдау есептерін шешуге арналған эвристикалық тәсілге негізделген интеллектуалды шешімді қолдау жүйесі жасалды. Кокс өндіру процесін тиімді басқару үшін модельдеу және шешім қабылдау процестерін жүзеге асыратын, әзірленген шешім қабылдауды қолдау жүйесінің негізгі интерфейстері келтіріліп, сипатталған. Алынған нәтижелердің жаңалығы мен артықшылығы олардың мүмкіндігінде жатыр. Алынған нәтижелердің жаңалығы мен артықшылығы олардың баяу кокстеу процесін модельдеу және оптимизациялау, сондай-ақ алынған кокстың сапасын айқынсыз ортада басқару мүмкіндігінде жатыр. Зерттеу нәтижелерінің практикалық маңыздылығы - олар анықсыздық пен бастапқы ақпараттың айқын еместігімен сипатталатын шынайы жағдайларда кокс өндіру процесін жедел және тиімді басқаруға мүмкіндік беруіндеі.

Түйін сөздер: *лингвистикалық модельдер, мұнай коксы, баяу кокстеу процесі, кокстеу реакторлары, шешім қабылдау.*

B. Orazbayev[1], A. Kishubayeva[2]*, K. Orazbayeva[3], Л. Abdibekova[3], B. Utenova[4]
[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University,
Z01A3D7, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev str., 2
[2]Toraighyrov University,
S14P3K7, Republic of Kazakhstan, Pavlodar, st. Lomov, 64
[3]Esil university, Z01A3D7, Kazakhstan, Astana, Zhubanova street 7
[4]Atyrau University of Oil and Gas,
060008, Kazakhstan, Atyrau, Baimukhanov St. 45,a
*e-mail: Altynai_999@mail.ru

LINGUISTIC MODELS AND DECISION SUPPORT SYSTEM FOR CONTROLING THE YIELD AND QUALITY OF PETROLEUM COKE

This paper examines the problems of linguistic modeling and process control for high-quality coke production in a fuzzy environment using a decision support system and proposes approaches to addressing them. A method for synthesizing linguistic models of complex process systems with fuzzy input and output parameters is proposed, drawing on expert knowledge and the Fuzzy Logic Toolbox application in MATLAB. Using the proposed method as a fuzzy inference system, linguistic models were synthesized to evaluate coke yield and its quality indicators during delayed coking. Membership functions for the input and output parameters of the delayed coking process and 3D input-output surfaces are constructed, enabling analysis and decision-making on the management of high-quality coke production. An intelligent decision support system was created based on the linguistic models synthesized in this paper, models of a distillation column for a delayed coking unit developed and published by the authors, and a heuristic method for solving decision-making problems. The main interfaces of the developed decision support system, implementing modeling and decision-making processes for the effective management of the coke production process, are presented and

described. The novelty and advantage of the obtained results lies in their ability to model and optimize the delayed coking process and manage the quality of the produced coke in a fuzzy environment. The practical significance of the research results lies in their ability to quickly and effectively manage the coke production process in real-world conditions characterized by uncertainty and ambiguity of the initial information.

Key words: *linguistic models, petroleum coke, delayed coking process, coking reactors, decision making.*

Сведения об авторах

Батыр Бидайбекович Оразбаев – доктор технических наук, профессор кафедры «Системный анализ и управления», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан; e-mail: batyr_o@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2109-6999.

Алтынай Тулпаровна Кишубаева* – докторант Торайгыров Университета, Павлодар, Казахстан; e-mail: Altynai_999@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1125-8696.

Кульман Нахановна Оразбаева – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы и технологии», Esil university, Республика Казахстан; e-mail: kulman_o@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1741-7553.

Лязат Муратовна Абдибекова – магистр, старший преподаватель кафедры «Информационные системы и технологии», Esil university, Республика Казахстан; e-mail: Lazatabdibekova59@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3690-3398.

Балбупе Есенжановна Утенова – кандидат технических наук, профессор факультета «Информационные технологии», Атырауский университет нефти и газа, Республика Казахстан; e-mail: balbupe_u_e@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6705-5830.

Авторлар туралы мәліметтер

Батыр Бидайбекович Оразбаев – техника ғылымдарының докторы, «Жүйелік талдау және басқару» кафедрасының профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті; Қазақстан; e-mail: batyr_o@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2109-6999.

Алтынай Тулпаровна Кишубаева* – Торайгыров Университеті докторанты, Қазақстан; e-mail: Altynai_999@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1125-8696.

Кульман Нахановна Оразбаева – техника ғылымдарының докторы, «Ақпараттық жүйелер және технологиялар» кафедрасының профессоры, Esil university, Қазақстан; e-mail: kulman_o@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1741-7553.

Лязат Муратовна Абдибекова – магистр, аға оқытушы, «Ақпараттық жүйелер және технологиялар» кафедрасының профессоры, Esil university, Қазақстан; e-mail: Lazatabdibekova59@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3690-3398.

Балбупе Есенжановна Утенова – техника ғылымдарының кандидаты, «Ақпараттық технологиялар» факультетінің профессоры, Атырау мұнай және газ университеті, Қазақстан; e-mail: balbupe_u_e@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6705-5830.

Information about the authors

Batyr Orazbayev – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of System Analysis and Management; L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: batyr_o@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2109-6999.

Altynay Kishubayeva* – doctoral student Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan; e-mail: Altynai_999@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1125-8696.

Kulman Orazbayeva – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Esil University, Republic of Kazakhstan; e-mail: kulman_o@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1741-7553.

Lyazat Abdibekova – doctor of philosophy, senior lecturer at the faculty of Physics, mathematics, and information technologies of M.Utemisov University, Republic of Kazakhstan; e-mail: Lazatabdibekova59@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3690-3398.

Balbupe Utenova – Candidate of Technical Sciences, Professor of the Faculty of Information Technology; Atyrau University of Oil and Gas, Republic of Kazakhstan; e-mail: balbupe_u_e@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-6705-5830.

Поступила в редакцию 01.06.2026
Поступила после доработки 27.06.2026
Принята к публикации 30.06.2026