

35. Chernikov B. V. *Upravlenie kachestvom programmnoy obespecheniya* [Software quality management], Moscow, FORUM : INFRA-M Publ., 2012. 240 p.
36. Betty H. C. Cheng and 28 more. Software Engineering for Self-Adaptive Systems: A Research Roadmap. *Lecture Notes in Computer Science*, 2009, vol. 5525, pp. 1–26.
37. Medvidovic Nenand and others. Engineering Heterogeneous Robotics Systems: A Software Architecture-Based Approach. *Computer*, May 2011, vol. 44, issue 5, pp. 62–71.
38. Schlegel C., Lotz A., Lutz M., Berns K., Dillmann R., Maehle E. Model-driven software systems engineering in robotics: Covering the complete life-cycle of a robot. Special Issue: Robot Control Architectures. *Information Technology*, 2015, vol. 57 (2), pp. 85–98. DOI: 10.1515/itit-2014-1069.
39. Zimin G. A., Mordvinov D. A. Visual dataflow language for educational robots programming. *Trudy Instituta sistemnoy programirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute of System Programming, RAS], 2016, vol. 28, no. 2, pp. 45–62.
40. Yim Mark and others. Modular Self-Reconfigurable Robot Systems (Grand Challenges of Robotics). *IEEE Robotics & Automation Magazine*, March 2007, vol. 14, issue 1, pp. 43–52.

УДК 004.891.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Статья поступила в редакцию 16.04.2017, в окончательном варианте – 20.06.2017.

Джамбеков Азамат Матифулаевич, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, аспирант, ORCID 0000-0002-8768-9474, e-mail: azamat-121@mail.ru.

Для поддержки принятия решений по управлению процессом каталитического риформинга (КР) введен обобщенный критерий оптимальности (ОКО), включающий затраты на производство продукта и его октановое число. Описана задача управления процессом КР, которая заключается в определении таких управляющих воздействий, при которых обеспечивается экстремум ОКО. Разработана методика управления процессом КР в условиях неопределенности. Определены нечеткие цель и ограничения при управлении процессом КР. Нечеткая цель сформулирована как «ОКО должен быть минимальным». Одно из нечетких ограничений сформулировано как «Активность катализатора должна быть выше средней», а другое – «Состояние печи риформинга должно быть лучше среднего». Нечеткие цель и ограничения представлены в виде нечетких множеств на универсальном множестве альтернатив. В качестве альтернатив используются значения температуры на выходе из печи. Представлено выражение для определения нечеткого решения с использованием схемы Беллмана – Заде. На основе этого выражения определена альтернатива, при которой функция принадлежности нечеткого решения достигает максимума. Для полученной альтернативы с использованием гибридной математической модели процесса КР определены управляющие воздействия, обеспечивающие экстремум ОКО. Разработано программное обеспечение (ПО), которое реализует методику динамического управления процессом КР на ЭВМ в условиях неопределенности. Для обеспечения интерфейса с пользователем это ПО содержит ряд вкладок. Вкладка «Исходные данные» ПО необходима для заполнения значений зависимости обобщенного критерия оптимальности от температуры на выходе из печи, а также для задания функций принадлежности терм-множеств лингвистических переменных «Активность катализатора», «Состояние печи». Вкладка «Определение нечеткого решения» служит для задания нечеткой цели и нечетких ограничений с учетом заданных терм-множеств во вкладке «Исходные данные». Вкладка «Определение нечеткого решения» необходима для построения графика функций принадлежности нечеткого решения и определения альтернативы, соответствующей максимуму данной функции принадлежности. Вкладка «Определение вектора управлений» служит для определения управляющих воздействий, соответствующих экстремуму ОКО.

Ключевые слова: каталитический риформинг, обобщенный критерий оптимальности, нечеткая цель, нечеткое ограничение, активность катализатора, состояние печи риформинга, температура на выходе из печи риформинга, универсальное множество альтернатив, функция принадлежности, лингвистическая переменная

USE OF INFORMATION TECHNOLOGIES FOR PROVIDING AUTOMATED CONTROL OF THE PROCESS OF CATALYTIC RIFORMING IN THE CONDITIONS OF UNCERTAINTY

The article has been received by editorial board 16.04.2017, in the final version – 20.06.2017.

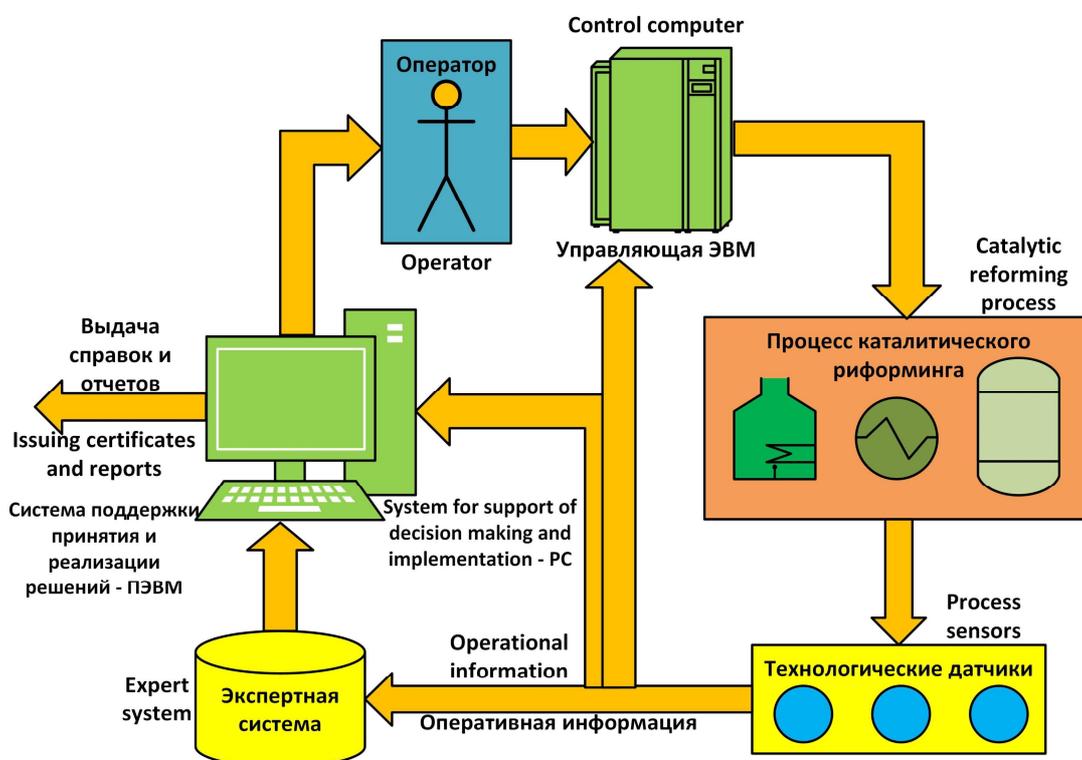
Dzhambekov Azamat M., Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, post-graduate student, ORCID 0000-0002-8768-9474, e-mail: azamat-121@mail.ru.

To support the decision-making on the management of the catalytic reforming process (CR), a generalized optimality criterion (GOC) is introduced, including the cost of producing the product and its octane number. The task of controlling the process of the CR is described, which consists in determining such control actions under which the extremum of the GOC is provided. A method for controlling the process of the CR under conditions of uncertainty has been developed. The fuzzy goal and limitations in the management of the CR process have been determined. The fuzzy goal is formulated as “The GOC

should be minimal”. One of the fuzzy restrictions is formulated as “The catalyst activity should be above average”, and the other – “The condition of the reforming furnace should be better than the average”. Fuzzy goal and constraints are represented as fuzzy sets on a universal set of alternatives. As an alternative, the temperature at the exit from the furnace is used. An expression is given for determining a fuzzy solution using the Bellman – Zade scheme. On the basis of this expression, an alternative is defined, under which the membership function of the fuzzy solution reaches its maximum. For the obtained alternative, with the use of a hybrid mathematical model of the CR process, the control actions that ensure the extremum of the GOC are determined. The software is developed that implements the method of controlling the process of the CR in conditions of uncertainty on the computer. For support of the interface with the user the software contains a row of tabs. The “Initial data” tab is required to fill the values of the dependence of the GOC on the temperature at the exit from the furnace, and also to specify the membership functions of the term sets of the linguistic variables “Catalyst activity”, “Furnace status”. The “Definition of fuzzy solution” tab is used to set a fuzzy goal and fuzzy constraints with the given term sets in the “Input data” tab. The “Definition of fuzzy solution” tab is necessary for plotting the fuzzy solution membership functions and determining the alternative corresponding to the maximum of this membership function. The “Definition of the control vector” tab is used to determine the control actions corresponding to the extremum of the GOC.

Keywords: catalytic reforming, generalized optimality criterion, fuzzy goal, fuzzy constraint, catalyst activity, reforming furnace condition, reforming furnace outlet temperature, universal set of alternatives, membership function, linguistic variable

Графическая аннотация (Graphical annotation)



Каталитический риформинг (КР) является важнейшим технологическим процессом современной нефтепереработки и нефтехимии. В течение последнего полувека процесс КР используется для получения высокооктанового бензина, ароматических углеводородов и водорода [14]. Совершенствование процесса КР стимулируется постоянным введением новых требований к качеству моторных топлив и их химическому составу, в т.ч. и с учетом экологических соображений. Возрастающая с каждым годом актуальность совершенствования процесса КР определяется ростом потребности в высокооктановом моторном топливе и источниках сырья для нефтехимии [8]. По состоянию на 2014 г. доля процессов риформинга в общем числе процессов нефтепереработки в Восточной Европе составляла 13,4 % [11].

Одно из важных направлений повышения эффективности управления процессом КР – разработка системы оптимального управления с использованием адекватной математической модели (ММ) процесса [7]. В условиях воздействия большого количества возмущений на процесс КР применение существующих систем оптимального управления может быть достаточно ограниченным, в т.ч. из-за резких изменений параметров ММ процесса и, как следствие, необходимости обучения / адаптации ММ под новые режимы. По этой причине сейчас чаще всего управление процессом КР осуществляют с использованием локальных систем автоматического регулирования технологических параметров [5], а оперативное управление и принятие решений выполняют операторы на автоматизированных рабочих местах [12].

Одним из современных подходов к совершенствованию управления процессом КР является определение (выработка) управляющих воздействий с учетом нечетких целей и ограничений [1, 4]. Указанный

подход в ряде случаев может более адекватно отражать фактически существующую практику управления процессом КР, т.к. решения нередко принимаются и реализуются в нечетких условиях. В рамках нечеткого подхода для разработки системы управления процессом КР необходимо определение управляющих воздействий, соответствующих экстремуму критерия оптимальности. В условиях неполноты информации цель управления процессом КР может быть сформулирована, например, как «Критерий оптимальности должен быть минимальным» и представлена в виде нечеткого множества. Аналогично могут быть представлены наиболее важные ограничения процесса КР: «Активность катализатора должна быть выше средней», «Состояние печи должно быть лучше среднего» [3]. Точность задания целей и ограничений управления процессом КР зависит от полноты экспертных знаний о протекании этого процесса. При таких условиях имеет место неопределенность управления процессом КР. Использование схемы Беллмана – Заде позволяет находить решения в условиях неопределенности при нечетких целях и ограничениях [13].

Однако в существующих работах в области моделирования и управления процессом КР недостаточно проработаны вопросы управления процессом КР в условиях неопределенности. Разработка методики управления процессом КР в условиях неопределенности позволяет обеспечить учет экспертной информации при определении оптимальных управляющих воздействий.

Цель данной работы – повышение эффективности процесса КР путем разработки методики управления этим процессом в условиях неопределенности.

Постановка задачи. Показателями эффективности процесса КР являются следующие: октановое число продукта ON и затраты на производство продукта Z . К данным показателям устанавливаются требования вида [15]:

$$ON \geq ON_0, Z \leq Z_0, \quad (1)$$

где ON_0 – минимальное октановое число; Z_0 – максимальные затраты.

Теоретико-множественная модель процесса КР представлена нами в виде кортежа:

$$\langle U, A, X_{in}, X_{in}^*, ON, Z \rangle, \quad (2)$$

где U – вектор управлений, A – вектор переменных состояния, X_{in} – вектор четких входных переменных, X_{in}^* – вектор входных переменных в виде нечетких множеств.

Модель (2) является гибридной, поскольку включает как количественные, так и качественные показатели [6, 14].

Для производства бензина важно получение октанового числа ON выше минимального ON_0 и обеспечение затрат Z ниже максимально допустимых Z_0 . Таким образом, получаем обобщенный критерий оптимальности (ОКО) процесса [6]:

$$I = k(ON/ON_0) + Z_0/Z, \quad (3)$$

где k – весовой коэффициент, регулирующий относительную важность показателей ON и Z в отношении принятия решений, $0 < k < 1$.

Значения ОКО определяются с использованием разработанной в [6] гибридной модели процесса КР.

Сформулируем задачу управления процессом КР в общем виде. При заданных входных четких X_{in} и нечетких X_{in}^* переменных необходимо найти управляющие воздействия U , обеспечивающие минимум ОКО:

$$I(ON, Z, U, A, X_{in}, X_{in}^*) \rightarrow \min, \quad (4)$$

при наложенных связях в виде модели (2) и ограничениях вида:

$$ON \geq ON_0, Z \leq Z_0, U \in V, A \in W, \quad (5)$$

где V – множество значений управляющих воздействий, W – множество значений переменных состояния процесса КР.

Разработка методики управления процессом каталитического реформинга в условиях неопределенности. Воздействие различных возмущающих воздействий усложняет процедуру принятия решений (ППР) при управлении процессом КР. Рассмотрим ППР при выборе управляющих воздействий для процесса КР. При управлении процессом у эксперта-оператора формируются словесные высказывания, определенные как правила управления. Они могут быть формализованы с использованием методов искусственного интеллекта. Точность задания целей и ограничений управления процессом КР зависит от полноты экспертных знаний о протекании процесса. При таких условиях имеет место неопределенность управления процессом КР. Она определяется неточностью, неполнотой и лингвистической распылчатостью (нечеткостью), присутствующей в экспертной информации. Теоретическим базисом разработки подходов к принятию решений в условиях неопределенности являются методы искусственного интеллекта [9, 10, 17].

При этом необходимо обеспечить повышение эффективности принятия решений при управлении процессом КР на основе применения методов искусственного интеллекта в отношении выбора управляющих воздействий в условиях неопределенности.

Автором выделены следующие основные этапы методики управления процессом КР в условиях неопределенности:

Этап¹. Задание нечетких целей и ограничений в виде словесных высказываний (формулировок).

Этап². Определение универсального множества альтернатив.

Этап³. Формализация нечетких целей и ограничений в виде нечетких множеств на универсальном множестве альтернатив.

Этап⁴. Определение нечеткого решения по схеме Беллмана – Заде в виде нечеткого множества на универсальном множестве альтернатив.

Этап⁵. Определение альтернативы с максимальной функцией принадлежности нечеткого решения.

Этап⁶. Определение управляющих воздействий с использованием полученной альтернативы на основе гибридной ММ процесса КР.

Нечеткой целью \tilde{G} в ППР при управлении процессом КР является выражение «ОКО должен быть минимальным». Как было отмечено выше, одним из нечетких ограничений \tilde{C}_1 является «Активность катализатора должна быть выше средней», а другим (\tilde{C}_2) – «Состояние печи риформинга должно быть лучше среднего».

Использование данных ограничений объясняется тем, что при повышении эффективности процесса КР необходимо поддержание удовлетворительных значений параметров катализатора и печи риформинга. Тем самым, ограничение \tilde{C}_1 служит для увеличения межрегенерационного периода, а ограничение \tilde{C}_2 предназначено для увеличения межремонтного периода [5].

Пусть $X = \{x\}$ – множество альтернатив. Нечеткая цель \tilde{G} представляет собой нечеткое множество на универсальном множестве X . Значения альтернатив универсального множества X определяются величинами температуры нестабильного катализатора на выходе из печи в диапазоне 100...300 °С [7]. Согласно рисунку 1 минимальное значение ОКО процесса КР равно 1,97, что в соответствии с постановкой задачи (4) является наилучшим вариантом при управлении процессом КР.

Такое значение достигается при температуре нестабильного катализатора на выходе из печи равной $x = 210$ °С для установки ЛЧ-35-11/1000. Интервалом отклонений альтернатив x в окрестности точки минимума ОКО является диапазон 205...215 °С, устанавливаемый регламентом процесса КР. Аналитическое описание зависимости (рис. 1), полученной путем усреднения соответствующих кривых для нескольких установок КР различных производителей, затруднено существованием минимаксных композиций и связанных с ними бесконечными разрывами функции в разработанной гибридной ММ процесса КР, на основе которой определяются значения $I(x)$ [6].



Рис. 1. Зависимость ОКО от температуры на выходе из печи риформинга

Под влиянием возмущений ОКО процесса КР отклоняется от своего минимума. Поэтому нечеткая цель \tilde{G} сформулирована как «ОКО должен быть минимальным» и представлена нечетким множеством с функциями принадлежности вида:

$$\mu_G(x) = \exp(-0,01 \cdot (x - 210)^2), x \in X. \quad (6)$$

С учетом рекомендаций [2] для описания нечеткой цели выбрана гауссова функция принадлежности (6) с координатой максимума равной 210 °С и с коэффициентом концентрации равным 0,01. Последний коэффициент характеризует степень отклонения значений гауссовой функции принадлежности относительно начала координат. Значение координаты максимума 210 °С соответствует приведенному выше значению температуры на выходе из печи, при которой достигается минимум ОКО.

Как было отмечено выше, допустимым является отклонение температуры на выходе из печи $x = 210$ °С до границ диапазона 205...215 °С, при которых все равно ОКО минимален по отношению к двум другим локальным минимумам.

Нечеткое ограничение \tilde{C}_1 может быть представлено нечетким множеством с функциями принадлежности вида:

$$\mu_{C_1}(x) = \frac{1}{1 + \exp(-0,05 \cdot (x - 160))}, x \in X. \quad (7)$$

С учетом рекомендаций [2] для описания нечеткого ограничения \tilde{C}_1 выбрана сигмоидная функция принадлежности (7) с координатой перехода через 0,5 равной 160 и коэффициентом крутизны равным 0,05. Значение координаты перехода 160 получено из графика функции принадлежности лингвистической переменной (ЛП) «Активность катализатора» AC^* (рис. 2) и соответствует значению «Активность катализатора средняя Z» [16].



Рис. 2. График функции принадлежности ЛП «Активность катализатора» для процесса КР

Нечеткое ограничение \tilde{C}_2 может быть представлено нечетким множеством с функциями принадлежности вида:

$$\mu_{C_2}(x) = \frac{1}{1 + \exp(-0,08 \cdot (240 - x))}, x \in X. \quad (8)$$

С учетом рекомендаций [2] для описания нечеткого ограничения \tilde{C}_2 была выбрана сигмоидная функция принадлежности (8) с координатой перехода через 0,5 равной 240 и коэффициентом крутизны равным 0,08. Значение координаты перехода 240 получено из графика функции принадлежности ЛП «Состояние печи риформинга» CF^* (рис. 3) и соответствует значению «Состояние печи среднее Z» [16].



Рис. 3. График функции принадлежности ЛП «Состояние печи риформинга» для процесса КР

По схеме Беллмана – Заде нечеткое решение \tilde{D} определяется как нечеткое множество на универсальном множестве X и представляет собой пересечение нечеткой цели \tilde{G} и нечетких ограничений \tilde{C}_1, \tilde{C}_2 [13]:

$$\tilde{D} = \tilde{G} \cap \tilde{C}_1 \cap \tilde{C}_2. \tag{9}$$

Определим функцию принадлежности нечеткого решения \tilde{D} как минимум над функциями принадлежности (6–8):

$$\mu_D(x) = \min(\mu_G(x), \mu_{C_1}(x), \mu_{C_2}(x)) = \min\left(\exp(-0,01 \cdot (x - 210)^2), \frac{1}{1 + \exp(-0,05(x - 160))}, \frac{1}{1 + \exp(-0,08(240 - x))}\right). \tag{10}$$

Взаимосвязь между нечеткими целью, ограничениями и решением показана на рисунке 4. На основе конфликта цели и ограничений при управлении процессом КР определяем альтернативу «x» с максимальной функцией принадлежности нечеткого множества \tilde{D} . Получаем область значений функции принадлежности $\mu_D(x)$ «Решение», соответствующую множеству альтернатив для требуемых управляющих воздействий.

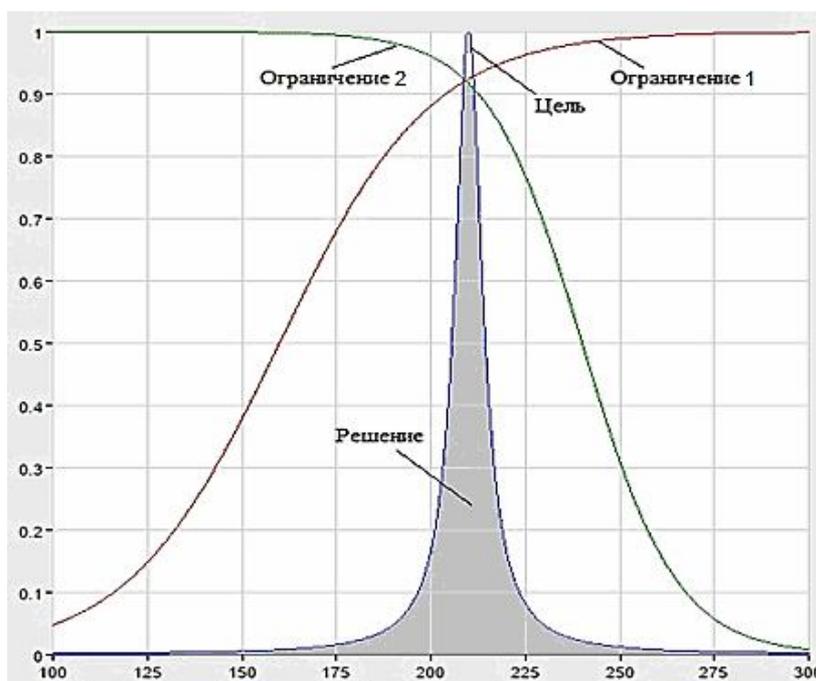


Рис. 4. Принятие решения в системе управления процессом КР по схеме Беллмана – Заде

На основе выражения (10) автором была получена система уравнений, на основе которой определяем альтернативу «x», соответствующую максимальной функции принадлежности нечеткого множества \tilde{D} :

$$\begin{cases} \exp(-0,01 \cdot (x - 210)^2) = \frac{1}{1 + \exp(-0,05 \cdot (x - 160))}; \\ \exp(-0,01 \cdot (x - 210)^2) = \frac{1}{1 + \exp(-0,08 \cdot (240 - x))}; \\ \frac{1}{1 + \exp(-0,05 \cdot (x - 160))} = \frac{1}{1 + \exp(-0,08 \cdot (240 - x))}. \end{cases} \tag{11}$$

Получаем решение системы уравнений (11) $x = 212$ °С, соответствующее максимальной функции принадлежности нечеткого решения. Следовательно, при температуре на выходе из печи $x = 212$ °С достигается нечеткая цель \tilde{G} , сформулированная как «Обобщенный критерий оптимальности должен быть минимальным» при нечетких ограничениях \tilde{C}_1 и \tilde{C}_2 .

Используя аналитические выражения из [6], при заданных значениях входных переменных получаем значения управляющих воздействий при $x = 212$ °С для установки ЛЧ-35-11/1000 (табл. 1).

Первая часть таблицы 1 содержит входные переменные, которые необходимо задать в гибридную ММ вместе с альтернативой $x = 212$ °С для определения управляющих воздействий. Входные переменные X_{in}^z , определяющие затраты на производство продукта, являются исходными данными для расчета управляющих воздействий U^z , влияющих на затраты на производство продукта. Входные переменные X_{in}^{on} , определяющие октановое число продукта, являются исходными данными для расчета управ-

ляющих воздействий U^{on} , влияющих на октановое число продукта. Значения переменных X_{in}^z, X_{in}^{on} соответствуют допустимым интервалам изменения данных переменных за ноябрь 2015 г. для установки ЛЧ-35-11/1000 Ачинского НПЗ при стандартных условиях протекания процесса КР.

Таблица 1. Определение управлений по схеме Беллмана – Заде

Входные переменные X_{in}^z , определяющие затраты на производство продукта						
Стоимость сырья C_r	Стоимость электроэнергии C_e	Стоимость топливного газа C_{fg}	Стоимость катализатора C_c	Стоимость реагента C_{rg}	Показатель постоянных затрат α	Время работы установки t
17568 руб./т	3,89 руб./МДж	10,65 руб./м ³	1843 руб./кг	12567 руб./кг	0,01 млн руб.	80640 ч
Входные переменные X_{in}^{on} , определяющие октановое число продукта						
Коэффициент избытка воздуха в первой печи α_1	Коэффициент избытка воздуха во второй печи α_2	Коэффициент избытка воздуха в третьей печи α_3	Температура на входе в первую печь T_{in1}	Четкая оценка ЛП «Качество сырья» QR	Четкая оценка ЛП «Качество топливного газа» QFG	
1	1,05	1,1	170 °С	2,5	5	
Управляющие воздействия U^z , влияющие на затраты на производство продукта						
Расход сырья G_r	Расход электроэнергии G_e	Расход топливного газа G_{fg}	Расход катализатора G_c	Расход реагента G_{rg}		
1000 т	82 МДж	25 м ³	0,02 кг	0,001 кг		
Управляющие воздействия U^{on} , влияющие на октановое число продукта						
Производительность центробежного компрессора Q_{cc}	Объемный расход сырья Q_r	Количество сбрасываемого ВСГ Q_{hg}	Объемный расход топливного газа в первую печь Q_{fg1}	Объемный расход топливного газа во вторую печь Q_{fg2}	Объемный расход топливного газа в третью печь Q_{fg3}	
210000 нм ³ /ч	130 м ³ /ч	90000 нм ³	750 м ³ /ч	850 м ³ /ч	950 м ³ /ч	

Таким образом, полученные управляющие воздействия обеспечивают достижения минимума ОКО, при котором обеспечивается компромисс между повышением качества продукта и снижением затрат на его производство. Для примера из таблицы 1 на основе разработанной методики было определено следующее: ОКО $I = 1,97$; затраты на производство продукта $Z = 0,825$ (млрд руб.); октановое число продукта $ON = 92,83$. Данные значения определяются с использованием разработанной гибридной ММ процесса КР, поэтому нет необходимости в оценке адекватности методики управления процессом КР на основе схемы Беллмана – Заде.

Отметим, что преимуществом применения схемы Беллмана – Заде в ППР при управлении процессом КР является отсутствие различий между целью и ограничениями. Это связано с тем, что всякое разделение на цели и ограничения условное: если в формуле (9) поменять местами цель и ограничение, то решение не изменится.

Программная реализация методики управления процессом каталитического реформинга в условиях неопределенности. Разработанная методика управления процессом КР в условиях неопределенности была реализована в виде программного обеспечения (ПО) на языке C#.

Описание пользовательской части ПО выполнено для ЭВМ под управлением различных версий операционной системы MS Windows XP/Vista/7/8/8.1/10. Главное окно (окно «исходные данные») ПО показано на рисунке 5.

Во вкладке «Исходные данные» необходимо заполнение значений зависимости ОКО от температуры на выходе из печи $I(x)$. После ввода значений отображается альтернатива, соответствующая минимуму ОКО. В качестве универсального множества альтернатив принимается диапазон от минимального до максимального значения абсциссы зависимости $I(x)$.

Далее требуется задать для ЛП «Активность катализатора» функции принадлежности трех термножеств: «Активность катализатора низкая N», «Активность катализатора средняя Z», «Активность катализатора высокая P». После задания нечетких множеств выводятся графики функций принадлежности трех термножеств для ЛП «Активность катализатора». Затем определяются значения координат максимума термножества «Активность катализатора средняя Z», которые необходимы для формирования нечеткого ограничения на активность катализатора.

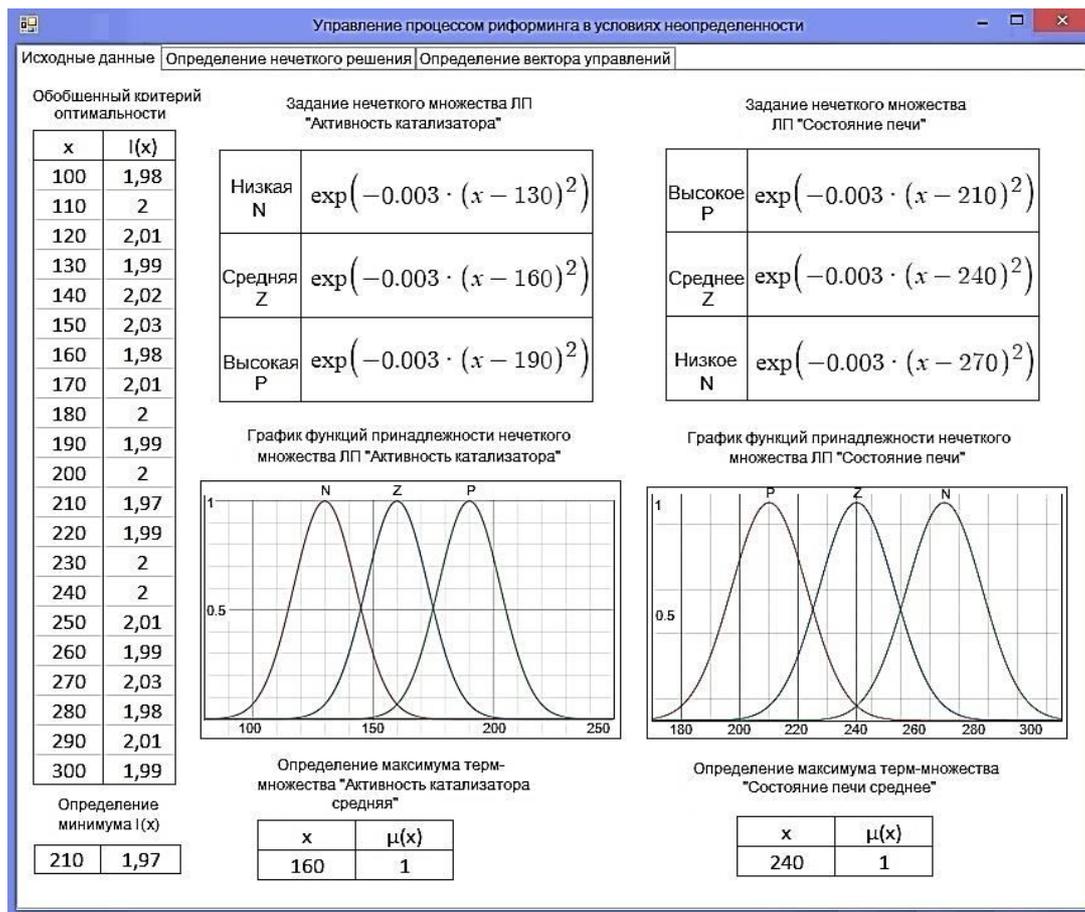


Рис. 5. Окно «Исходные данные»

Затем требуется задать для ЛП «Состояние печи» функции принадлежности трех терм-множеств: «Состояние печи низкая N», «Состояние печи средняя Z», «Состояние печи высокая P». После задания нечетких множеств выводятся графики функций принадлежности трех терм-множеств для ЛП «Состояние печи». Затем определяются значения координат максимума терм-множества «Состояние печи средняя Z», которые необходимы для формирования нечеткого ограничения на состояние печи.

Во вкладке «Определение нечеткого решения» необходимо задание нечеткой цели «ОКО должен быть минимальным» (рис. 6).

Функции принадлежности нечеткой цели задаются на основе полученных значений координат минимума зависимости I(x). После задания нечеткой цели выводится график функций принадлежности нечеткой цели.

Далее необходимо задание нечеткого ограничения «Активность катализатора должна быть выше средней». Функции принадлежности нечеткого ограничения задаются на основе полученных значений координат максимума терм-множества «Активность катализатора средняя Z». После задания нечеткого ограничения выводится график функций принадлежности нечеткого ограничения.

Затем нужно задать нечеткое ограничение «Состояние печи риформинга должно быть выше среднего». Функции принадлежности нечеткого ограничения задаются на основе полученных значений координат максимума терм-множества «Состояние печи риформинга среднее Z». После задания нечеткого ограничения выводится график функции принадлежности нечеткого ограничения.

На основе нечеткой цели и нечетких ограничений по схеме Беллмана – Заде определяется нечеткое решение, для которого строится график функции принадлежности во вкладке «Определение нечеткого решения». Определяется альтернатива, соответствующая максимуму функции принадлежности нечеткого решения.

Во вкладке «Определение вектора управлений» задаются входные переменные процесса КР (рис. 7). Для полученной альтернативы на основе разработанной гибридной ММ процесса КР определяются управляющие воздействия, соответствующие минимуму ОКО.

Для полученного вектора управлений на основе гибридной ММ процесса КР также определяются показатели качества процесса КР. Полученные результаты соответствуют разработанной методике управления процессом и гибридной ММ процесса КР. Это делает возможным использование данного ПО для определения вектора управлений.

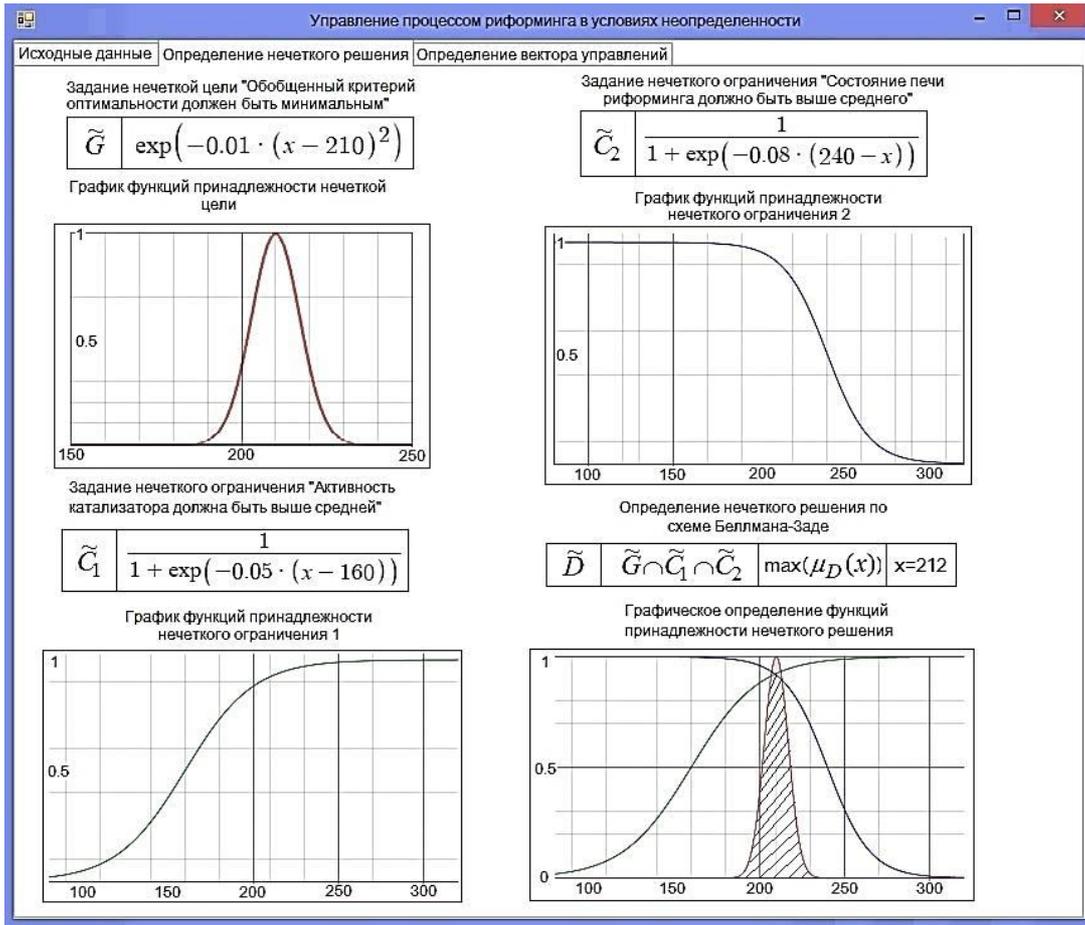


Рис. 6. Окно «Определение нечеткого решения»

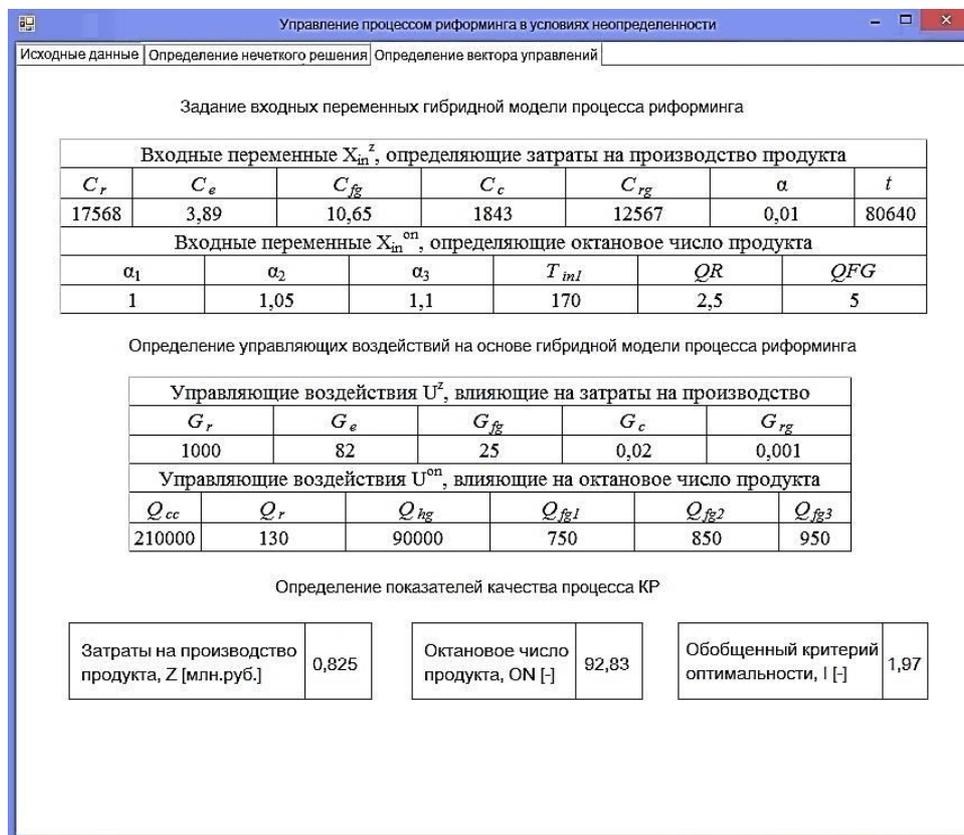


Рис. 7. Окно «Определение вектора управлений»

Таким образом, в результате выполнения работы достигнуты следующие результаты:

1. Показано, что использование нечеткого управления процессами КР может быть альтернативой «четкому управлению» – в силу объективно существующих условий реализации этих процессов; нечеткости информации о протекании этих процессов и пр.
2. Сформулирована задача управления процессом КР в условиях неопределенности, отличающаяся введением ОКО для оценки эффективности управления данным процессом.
3. Разработана методика управления процессом КР в условиях неопределенности, отличающаяся использованием схемы Беллмана – Заде для определения оптимальных управляющих воздействий при нечетких цели и ограничениях.
4. На основе данной методики определен вектор управлений, соответствующий минимуму $ОКО I = 1.97$.
5. Осуществлена программная реализация методики управления процессом КР в условиях неопределенности на языке C#.

Список литературы

1. Брумштейн Ю. М. Анализ некоторых моделей группового управления рисками / Ю. М. Брумштейн, О. Н. Выборнова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4. – С. 64–72 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4\(32\)/64-72.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4(32)/64-72.pdf)).
2. Васильева Н. В. Построение функций принадлежности параметров технологического процесса на основе нечеткой кластеризации производственных данных / Н. В. Васильева, Э. Д. Кадыров // Записки Горного института. – 2013. – Т. 202. – С. 251–253.
3. Власов С. С. Моделирование процесса отбензинивания нефти при прогнозировании показателей качества бензина / С. С. Власов, А. Г. Шумихин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 1, № 1 (63). – С. 90–94.
4. Воробович Н. П. Применение теории оптимального управления для решения многокритериальной задачи сетевого планирования с нечеткими ограничениями по ресурсам / Н. П. Воробович // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2009. – № 8. – С. 15–18.
5. Джамбеков А. М. Нечеткая система управления процессом каталитического реформинга / А. М. Джамбеков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4. – С. 268–280 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4\(32\)/268-280.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4(32)/268-280.pdf)).
6. Джамбеков А. М. Расчет эффективности процесса каталитического реформинга с использованием гибридной модели / А. М. Джамбеков, И. А. Щербатов, О. В. Антонов, О. М. Проталинский // Автоматизация, телемеханика и связь в нефтяной промышленности. – 2017. – № 2. – С. 26–33.
7. Иванчина Э. Д. Повышение технико-экономической эффективности каталитического реформинга с использованием компьютерной моделирующей системы / Э. Д. Иванчина, В. В. Дериглазов, И. К. Занин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2011. – Т. 319, № 3. – С. 105–109.
8. Имашев У. Б. Особенности развития процесса каталитического реформинга в России / У. Б. Имашев, А. А. Тюрин, Е. А. Удалова // Башкирский химический журнал. – 2009. – Т. 16, № 4. – С. 184–186.
9. Литвинская О. С. Формализация принятия решений на основе целевого функционала / О. С. Литвинская // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2012. – № 1 (5). – С. 74–79.
10. Проталинский О. М. Проверка достоверности первичной информации в АСУ ТП с использованием нечетких множеств / О. М. Проталинский // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2003. – № 3. – С. 60.
11. Рахматуллин А. Р. Получение автомобильных бензинов с пониженным содержанием ароматических компонентов / А. Р. Рахматуллин, А. Ф. Ахметов, Э. Р. Нурмухаметова // Нефтегазовое дело. – 2014. – № 12–2. – С. 106–112.
12. Учаев Д. Ю. Анализ и управление рисками, связанными с информационным обеспечением человеко-машинных АСУ технологическими процессами в реальном времени / Д. Ю. Учаев, Ю. М. Брумштейн, И. М. Ажмухамедов, О. М. Князева, И. А. Дюдиков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2016. – № 2. – С. 82–97 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(34\)/82-97.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(34)/82-97.pdf)).
13. Хлопкова О. А. Нейроэволюционный метод интеллектуализации принятия решений в условиях неопределенности / О. А. Хлопкова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 3. – С. 114–129 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/3\(31\)/114-129.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/3(31)/114-129.pdf)).
14. Шарипов Р. А. Роль процесса каталитического крекинга в производстве высокооктановых автомобильных бензинов / Р. А. Шарипов, Г. М. Сидоров, Р. Р. Зиннатуллин, Ю. К. Дмитриев // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1–1. – С. 134.
15. Шумихин А. Г. Классификация технологических параметров процесса каталитического крекинга в нечеткой среде / А. Г. Шумихин, И. А. Вялых // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2009. – Т. 10. – С. 121–127.
16. Шумихин А. Г. Формирование функций принадлежности для алгоритма нечеткого управления технологическим процессом каталитического крекинга / А. Г. Шумихин, И. А. Вялых // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2010. – Т. 316, № 5. – С. 132–136.
17. Щербатов И. А. Классификация неопределенностей в задачах моделирования и управления сложными слабоформализуемыми системами / И. А. Щербатов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 1, № 1 (69). – С. 175–179.

References

1. Brumshteyn Yu. M., Vybornova O. N. Analiz nekotorykh modeley gruppovogo upravleniya riskami [Analysis of some models of group risk management]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 4, pp. 6–72 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4\(32\)/64-72.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4(32)/64-72.pdf)).
2. Vasileva N. V. Postroenie funktsiy prinadlezhnosti parametrov tekhnologicheskogo protsessa na osnove nechetskoy klasterizatsii proizvodstvennykh dannykh [Construction of the functions of the parameters of the technological process on the basis of fuzzy clustering of production data]. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], 2013, vol. 202, pp. 251–253.
3. Vlasov S. S., Shumikhin A. G. Modelirovanie protsessa otbenzinivaniya nefiti pri prognozirovani pokazateley kachestva benzina [Modeling the process of oil stripping while predicting the quality of gasoline]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2012, vol. 1, no. 1 (63), pp. 90–94.
4. Vorobovich N. P. Primenenie teorii optimalnogo upravleniya dlya resheniya mnogokriterialnoy zadachi setevogo planirovaniya s nechetskimi ogranicheniyami po resursam [Application of the optimal control theory for solving the multicriteria network planning problem with fuzzy resource constraints]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University], 2009, no. 8, pp. 15–18.
5. Dzhabbekov A. M. Nechetkaya sistema upravleniya protsessom kataliticheskogo riforminga [Fuzzy control system for the catalytic reforming process]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 4, pp. 268–280 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4\(32\)/268-280.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/4(32)/268-280.pdf)).
6. Dzhabbekov A. M., Shcherbatov I. A., Antonov O. V., Protalinskiy O. M. Raschet effektivnosti protsessa kataliticheskogo riforminga s ispolzovaniem gibridnoy modeli [Calculating the efficiency of the catalytic reforming process using a hybrid model]. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz v neftyanoy promyshlennosti* [Automation, telemechanization and communication in the oil industry], 2017, no. 2, pp. 26–33.
7. Ivanchina E. D., Deriglazov V. V., Zanin I. K. Povysenie tekhniko-ekonomicheskoy effektivnosti kataliticheskogo riforminga s ispolzovaniem kompyuternoy modeliruyushchey sistemy [Increase of technical and economic efficiency of catalytic reforming using computer modeling system]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Engineering Georesources], 2011, vol. 319, no. 3, pp. 105–109.
8. Imashev U. B., Tyurin A. A., Udalova Ye. A. Osobennosti razvitiya protsessa kataliticheskogo riforminga v Rossii [Peculiarities of the development of the catalytic reforming process in Russia]. *Bashkirskiy khimicheskiy zhurnal* [Bashkirsky chemical journal], 2009, vol. 16, no. 4, pp. 184–186.
9. Litvinskaya O. S. Formalizatsiya prinyatiya resheniy na osnove tselevogo funktsionala [Formalization of decision-making on the basis of the target functional]. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: the Results of the Past and the Problems of the Present Plus], 2012, no. 1 (5), pp. 74–79.
10. Protalinskiy O. M. Proverka dostovernosti pervichnoy informatsii v ASU TP s ispolzovaniem nechetskikh mnozhestv [Verification of the reliability of primary information in the process control system using fuzzy sets]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Higher Educational Establishments. The North Caucasus region. Series: Engineering], 2003, no. 3, p. 60.
11. Rakhmatullin A. R., Akhmetov A. F., Nurmukhametova E. R. Poluchenie avtomobilnykh benzinov s ponizhenym soderzhaniem aromatischeskikh komponentov [Obtaining motor gasolines with a reduced content of aromatic components]. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2014, no. 12–2, pp. 106–112.
12. Uchaev D. Yu., Brumshteyn Yu. M., Azhmukhamedov I. M., Knyazeva O. M., Dyudikov I. A. Analiz i upravlenie riskami, svyazannymi s informatsionnym obespecheniem cheloveko-mashinnykh ASU tekhnologicheskimi protsessami v realnom vremeni [Analysis and management of risks associated with the information support of man-machine control systems of technological processes in real time]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2016, no. 2, pp. 82–97 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(34\)/82-97.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(34)/82-97.pdf)).
13. Khlopokova O. A. Neyroevolyutsionnyy metod intellektualizatsii prinyatiya resheniy v usloviyakh neopredelennosti [Neuroevolutionary method of intellectualization of decision-making under conditions of uncertainty]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 3, pp. 114–129 ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/3\(31\)/114-129.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/3(31)/114-129.pdf)).
14. Sharipov R. A., Sidorov G. M., Zinnatullin R. R., Dmitriev Yu. K. Rol protsessa kataliticheskogo krekinga v proizvodstve vysokooktanovykh avtomobilnykh benzinov [The role of the catalytic cracking process in the production of high-octane gasolines]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2015, no. 1–1, p. 134.
15. Shumikhin A. G., Vyalykh I. A. Klassifikatsiya tekhnologicheskikh parametrov protsessa kataliticheskogo krekinga v nechetskoy srede [Classification of technological parameters of the catalytic cracking process in a fuzzy medium]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Chemical Technology and Biotechnology], 2009, vol. 10, pp. 121–127.
16. Shumikhin A. G., Vyalykh I. A. Formirovanie funktsiy prinadlezhnosti dlya algoritma nechetkogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami kataliticheskogo krekinga [Formation of membership functions for the algorithm of fuzzy control of the technological process of catalytic cracking]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Engineering Georesources], 2010, vol. 316, no. 5, pp. 132–136.
17. Shcherbatov I. A. Klassifikatsiya neopredelennostey v zadachakh modelirovaniya i upravleniya slozhnymi slaboformalizuemymi sistemami [Classification of uncertainties in problems of modeling and control of complex weakly formalizable systems]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2013, vol. 1, no. 1 (69), pp. 175–179.