УДК 004.896 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-54-62

Алгоритмы оптимального управления процессом каталитического риформинга бензиновых фракций

А.М. Джамбеков[a], А.Г. Кокуев[b]

Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева 16, Астрахань, Россия
[a]azamat-121@mail.ru, [b]kokuevag@gmail.com
[a]https://orcid.org/0000-0002-8768-9474, [b]https://orcid.org/0000-0003-1716-5998
Статья поступила 27.02.2018, принята 29.03.2018

В работе рассмотрена актуальная задача по разработке алгоритмов оптимального управления процессом каталитического риформинга, обеспечивающих оптимальные соотношения октанового числа бензина и производственных затрат. Введен обобщенный критерий оптимальности в качестве целевой функции, в соответствии с которой необходим поиск оптимальных управляющих воздействий. Поставлена и решена задача оптимального управления процессом каталитического риформинга в пространстве управления расходом сырья и топливного газа. Приведена краткая характеристика технологической схемы процесса каталитического риформинга. Для целей оптимального управления выполнен анализ процесса каталитического риформинга как объекта управления. Обоснована необходимость учета экспертной информации в виде нечетких целей и ограничений для уточнения вектора оптимальных управлений на основе применения методов принятия решений в нечетких условиях. Выполнена формализация нечетких целей и ограничений в виде нечетких множеств на универсальном множестве управлений. Обоснован выбор метода конфигураций для оптимизации целевой функции. Разработан алгоритм оптимизации процесса каталитического риформинга на основе метода конфигураций. Разработан алгоритм оптимального управления процессом каталитического риформинга на основе применения схемы Беллмана – Заде. Поставлена и решена задача оптимального управления процессом каталитического риформинга при изменении качества сырья и топливного газа. Предложен учет возмущений как изменений входных переменных, которые задаются экспертом-оператором в виде словесных описаний. Сформирован набор экспертных правил соответствия начальных значений входных переменных, возмущений и новых значений входных переменных. Использование алгоритмов оптимизации и оптимального управления позволяет повысить эффективность управления процессом каталитического риформинга.

Ключевые слова: каталитический риформинг; обобщенный критерий оптимальности; нечеткая цель; нечеткое ограничение; нечеткое решение.

Algorithms for optimal control of the process of catalytic reforming of gasoline fractions

A.M. Dzhambekov[a], A.G. Kokuev[b]

Astrakhan State Technical University; 16, Tatishcheva St., Astrakhan, Russia
[a]azamat-121@mail.ru, [b]kokuevag@gmail.com
[a]https://orcid.org/0000-0002-8768-9474, [b]https://orcid.org/0000-0003-1716-5998
Received 27.02.2018, accepted 29.03.2018

In this work, the actual task of developing algorithms for optimal control of the catalytic reforming process, ensuring optimal ratios of octane number of gasoline and production costs, is considered. A generalized optimality criterion is introduced as an objective function, in accordance with which it is necessary to search for optimal control actions. The problem of the optimal control of the catalytic reforming process in the space of two controls has been set and solved: the consumption of raw materials and the consumption of fuel gas. A brief description of the technological scheme of the catalytic reforming process is given. For the purpose of optimal control, the analysis of the process of catalytic reforming as a control object has been performed. The necessity of accounting for expert information in the form of fuzzy goals and limitations for clarifying the vector of optimal controls based on application of decision-making methods in fuzzy conditions is substantiated. The formalization of fuzzy goals and restrictions in the form of fuzzy sets on a universal set of controls is carried out. The selection of the configuration method for optimizing the objective function is justified. An algorithm for optimizing the catalytic reforming process is developed on the basis of the configuration method. An algorithm for optimal control of the catalytic reforming process is developed based on the Bellman-Zade scheme. The problem of optimal control over the process of catalytic reforming has been set and solved with the changing quality of raw materials and fuel gas. The inclusion of perturbations as changes in input variables, which are set by the expert operator in the form of verbal descriptions, is suggested. A set of expert rules for the correspondence of initial values of input variables, perturbations and new values of input variables is formed. The use of optimization algorithms and optimal control of the catalytic reforming process makes it possible to increase the efficiency of controlling the catalytic reforming process.

Keywords: catalytic reforming; generalized optimality criterion; fuzzy goal; unclear constraint; fuzzy solution.

Введение

Каталитический риформинг (КР) является важнейшим в нефтегазовой отрасли процессом, основным направлением использования которого является производство высокооктанового бензина. Совершенствование процесса КР стимулируется постоянным введением новых требований к качеству моторных топлив и их химическому составу, в т.ч. и с учетом экологических соображений. По состоянию на 2016 г. доля процессов риформинга в общем числе процессов нефтепереработки в Восточной Европе составляла 13,4 % [1]. В настоящее время мощности процесса КР в России составляют 9,3 % от суммарной мощности первичной переработки нефти. Поскольку компонентный состав бензина содержит 54,1 % риформата, процесс КР на отечественных предприятиях нефтепереработки занимает ведущее место [2].

Эффективное и бесперебойное протекание процесса КР обеспечивается автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУ ТП). Исследования в области моделирования и управления процессом КР, выполненные такими учеными, как В.В. Кафаров, Г.М. Панченков, И.Н. Дорохов, Н.Ф. Рубекин, Ю.М. Жоров, А.В. Кравцов, А.Г. Шумихин, Э.Д. Иванчина и др., направлены на повышение эффективности процесса КР на основе разработки систем оптимального управления по основным технико-экономическим показателям (доход, октановое число, прибыль и пр.), оптимизацию технологического режима процесса КР, управление качеством стабильного катализата, ситуационное управление процессом КР, управление с использованием базы знаний и пр. [3].

В результате анализа исследований установлено отсутствие подхода к управлению процессом КР, направленного на одновременное снижение производственных затрат и повышение качества бензина [4].

Как известно, эффективность производства бензина зависит не только от повышения октанового числа выпускаемого топлива, но и от снижения производственных затрат. В связи с этим актуальной является научная работа, связанная с разработкой системы управления процессом КР, обеспечивающей достижение оптимальных соотношений октанового числа бензина и производственных затрат [5].

Таким образом, определена необходимость разработки алгоритмов управления, обеспечивающих достижение оптимальных соотношений октанового числа бензина и производственных затрат.

Краткое описание технологического процесса

КР — это сложный химический процесс, включающий разнообразные реакции, основными из которых являются: дегидрирование шестичленных нафтенов, дегидроизомеризация пятичленных нафтенов, ароматизация (дегидроциклизация) парафинов, изомеризация парафинов, изомеризация ароматики, гидрокрекинг парафинов, гидродеалкилирование алкилбензолов, гидродециклизация пятичленных нафтенов в парафины. Данные реакции позволяют значительно улучшить антидетонационные свойства бензиновых фракций, а также увеличить содержание ароматических и изопарафиновых углеводородов во фракции [6]. Реакции процесса КР протекают при следующих режимах: температура на входе в реакторы составляет 480–530 ^{0}С; объемная скорость подачи сырья — 1,5 час$^{-1}$; давление на выходе из реактора — 2.8 МПа; присутствие катализатора; мольное соотношение «водород – сырье» равно 6:1 [7]. Основным сырьем КР являются прямогонные бензиновые фракции нефтей и газовых конденсатов [8].

Приведем краткую характеристику технологической схемы КР (рис. 1).

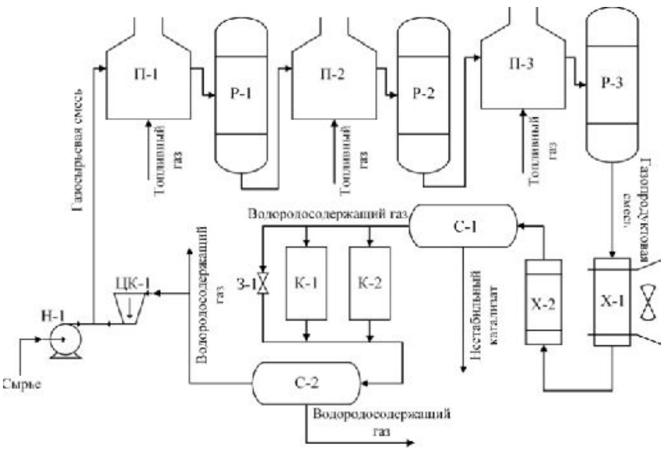

Рис. 1. Упрощенная технологическая схема процесса каталитического риформинга

Сырье подается на насос Н-1, соединяется с определенным количеством водородосодержащего газа (ВСГ), подаваемого от центробежного компрессора ЦК-1, с образованием газосырьевой смеси, которая поступает в трубчатую печь первой ступени П-1. Газосырьевая смесь первой ступени нагревается в печи П-1 путем сжигания топливного газа. После печи газосырьевая смесь поступает в реактор Р-1, где протекают реакции КР. Аналогично газосырьевая смесь поступает в реакторы Р-2, Р-3 после нагрева в печах П-2, П-3.

Выходящая из реактора третьей ступени Р-3 газопродуктовая смесь охлаждается в аппарате воздушного охлаждения Х-1, в водяном холодильнике Х-2 и поступает на сепарацию в сепаратор высокого давления С-1. В сепараторе С-1 газопродуктовая смесь разделяется на ВСГ и нестабильный катализат. После сепаратора С-1 отсепарированный ВСГ направляется на осушку в адсорберы-осушители К-1 и К-2, работающие параллельно. При отсутствии необходимости осушки отсепарированный ВСГ направляется по байпасу на прием центробежного компрессора ЦК-1 через сепаратор на приеме С-2. Нестабильный катализат из сепаратора С-1 направляется в блок стабилизации [9].

Для целей управления процессом КР необходимо провести его анализ как объекта управления (ОУ).

Анализ процесса как объекта управления. Для разработки системы управления процессом КР были выделены векторы входных переменных X_{IN}, переменных состояния процесса A, управляющих воздействий U, возмущений F, а также выходных переменных X_{OUT} (рис. 2). Необходимо перечислить все группы переменных процесса КР.

Вектор входных переменных X_{IN}: температура продуктовой смеси на входе в первую печь x_{in1} (℃); коэффициент избытка воздуха в печи x_{in2}; активность катализатора x_{in3}; качество сырья x_{in4}; качество топливного газа x_{in5}; состояние печи x_{in6}; стоимость электроэнергии x_{in7} (*р./кВт·ч*); стоимость охлаждающей воды x_{in8} (*р./м*^{3}); стоимость мазута x_{in9} (*р./кг*); стоимость топливного газа x_{in10} (*р./м*^{3}); стоимость катализатора x_{in11} (*р./кг*); стоимость моноэтаноламина x_{in12} (*р./кг*); стоимость цеолитов x_{in13} (*р./кг*).

Рис. 2. Анализ процесса КР как объекта управления

Вектор переменных состояния процесса *A*: температура продуктовой смеси на выходе из печи печи a_1, (℃); давление в реакторах a_2 (*МПа*); перепад температуры газосырьевой смеси в реакторе a_3 (℃); объемная скорость подачи сырья a_4 (*1/час*); мольное соотношение водород-сырье в системе a_5 (*%*); жесткость процесса в реакторе a_6; обобщенная жесткость процесса a_7; кратность циркуляции ВСГ a_8 (*нм*^{3}*/м*^{3}); содержание водорода в ВСГ a_9 (*%*); плотность сырья a_{10} (*кг/м*^{3}); удельная теплота сгорания топливного газа a_{11} (*Дж/м*^{3}); коэффициент потерь тепла в печи a_{12}; энтальпия продуктовой смеси на входе в печь a_{13} (*Дж/м*^{3}).

Вектор управлений *U*: расход топливного газа в печь u_1 (*м*^{3}*/час*); расход сбрасываемого ВСГ u_2 (*нм*^{3}*/час*); объемный расход сырья u_3 (*м*^{3}*/час*); производительность центробежного компрессора u_4 (*нм*^{3}*/час*); расход электроэнергии u_5 (*кВт·ч/т сырья*); расход охлаждающей воды u_6 (*м*^{3}*/т.сырья*); расход мазута u_7 (*кг/т сырья*); расход катализатора u_8 (*кг/т сырья*); расход моноэтаноламина u_9 (*кг/т сырья*); расход цеолитов u_{10} (*кг/т сырья*).

Вектор возмущений *F*: изменение активности катализатора F_1; изменение качества сырья F_2; изменение состояния печи риформинга F_3; изменение качества топливного газа F_4.

Вектор выходных переменных X_{OUT}: октановое число бензина x_{out1}, производственные затраты x_{out2}.

Постановка задачи. Цель работы — повышение эффективности процесса КР путем разработки алгоритмов управления данным процессом, обеспечивающих достижение оптимальных соотношений октанового числа бензина и производственных затрат.

При управлении процессом КР важно соблюдение требований: получение бензинового топлива с октановым числом *ON* выше минимального ON_0; осуществление производственных затрат *Z* (затрат на производство бензина) ниже максимальных Z_0. Поэтому к выходным переменным процесса КР устанавливаются ограничения вида (1):

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

где ON_0 — минимальное значение октанового числа; Z_0 — максимальные производственные затраты.

Помимо этого важно соблюдение ограничений на управляющие воздействия *U* и переменные состояния процесса *A* (2):

$$U \in \Omega_U\,, A \in \Omega_A\,, \qquad (2)$$

где Ω_U — множество значений управляющих воздействий *U*; Ω_A — множество значений переменных состояния процесса *A*.

В настоящей работе предложен *обобщенный критерий оптимальности* (ОКО) — числовая функция, в соответствие с которой осуществляется оптимизация процесса КР [10].

При построении выражения ОКО использованы следующие допущения. Необходимо сформировать ОКО таким образом, чтобы можно было на основе частных критериев отразить требование минимума его значения [11]. Для того чтобы ОКО был безразмерным, необходимо в его выражении нормировать частные критерии по величинам ON_0 и Z_0 [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Необходимо обеспечить задание весовых коэффициентов частных критериев в отношении принятия решений [13]. Составлено выражение ОКО в виде (3):

$$J(X_{IN},U) = \min_{\Omega_U}\left(k_1 \frac{ON_0}{ON(X_{IN},U)} + k_2 \frac{Z(X_{IN},U)}{Z_0}\right) = \\ = k_1 J_1(X_{IN},U) + k_2 J_2(X_{IN},U), \qquad (3)$$

где J_1, J_2 — нормированные частные критерии [14]; k_1, k_2 — весовые коэффициенты, регулирующие относительную важность критериев J_1, J_2 в отношении принятия решений, $k_1 + k_2 = 1$, $0 < k_1 < 1$, $0 < k_2 < 1$ [15].

Исходя из анализа процесса КР как объекта управления, формализована математическая модель (ММ) процесса КР в виде (4):

$$X_{OUT} = \Psi(X_{IN}, A, F, U)\,, \qquad (4)$$

где Ψ — система уравнений ММ процесса КР.

Сформулируем задачу оптимизации процесса КР. При заданных входных переменных X_{IN} найти управляющие воздействия *U*, обеспечивающие минимум ОКО *J* (5):

$$J(X_{IN},U) \to \min \qquad (5)$$

при наложенных связях в виде ММ (4) и ограничениях (1), (2).

Построение ММ процесса было выполнено в [16].

Ограничения на переменные процесса КР могут быть представлены в виде системы неравенств типа $x_{min} \leq x \leq x_{max}$, где x_{min}, x_{max} соответственно минимальное и максимальное значения переменной *x* процесса [2].

Применительно к установке риформинга Л-35-11/1000 составлена система неравенств-ограничений (6) на значения переменных процесса КР.

Система (6) необходима для установления ограничений на переменные или четкие оценки лингвистических переменных (ЛП). Поскольку вектор возмущений *F* представлен в виде набора ЛП, необходимо использование подхода к совершенствованию управления процессом КР путем определения (выработки) управляющих воздейст вий с учетом нечетких целей и ограничений на основе применения схемы Беллмана – Заде [17].

$$\begin{cases} 165 \le x_{in1} \le 195; 1 \le x_{in2} \le 1{,}2; 0 \le x_{in3} \le 1; \\ 0 \le x_{in4} \le 1; 0 \le x_{in5} \le 1; 0 \le x_{in6} \le 1; x_{in7} = 4{,}53; \\ x_{in8} = 21{,}68; x_{in9} = 18; x_{in10} = 5; x_{in11} = 30732; \\ x_{in12} = 101; x_{in13} = 170; 490 \le a_1 \le 520; \\ 2{,}75 \le a_2 \le 2{,}85; 35 \le a_3 \le 55; 1 \le a_4 \le 2; \\ 5{,}7 \le a_5 \le 6{,}9; 0 \le a_6 \le 1; 0 \le a_7 \le 1; \\ 1050 \le a_8 \le 1350; 0{,}5 \le a_9 \le 0{,}65; \\ 700 \le a_{10} \le 800; 862000 \le a_{11} \le 868000; \\ 0{,}05 \le a_{12} \le 0{,}35; 1553000 \le a_{13} \le 1559000; \\ 750 \le u_1 \le 1150; 10000 \le u_2 \le 13000; \\ 130 \le u_3 \le 190; 205000 \le u_4 \le 235000; \\ 92 \le u_5 \le 97; 7 \le u_6 \le 7{,}5; 70 \le u_7 \le 80; \\ 0{,}01 \le u_8 \le 0{,}03; 0{,}001 \le u_9 \le 0{,}003; \\ 0{,}02 \le u_{10} \le 0{,}05. \end{cases} \quad (6)$$

В [18] был предложен учет нечетких ограничений $\tilde{C}_1$ («активность катализатора должна быть выше средней», $\tilde{C}_2$ («состояние печи должно быть лучше среднего» и нечеткой цели $\tilde{G}$ («значение ОКО J должно быть минимальным») с использованием нечетких множеств для поиска оптимальных управлений в нечетких (расплывчатых) условиях по схеме Беллмана – Заде.

Примем допущение, что управление процессом КР осуществляется в пространстве двух управлений: объемного расхода сырья u_1 и объемного расхода топливного газа u_2 при наложенных связях в виде ММ процесса КР (4) и ограничениях (6).

Таким образом, при заданных входных переменных X_{IN} необходимо найти управляющие воздействия U, обеспечивающие минимум ОКО J (5) при наложенных связях в виде модели (4), ограничениях (6), нечеткой цели $\tilde{G}$ и нечетких ограничениях $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2$.

Учет нечеткой цели и нечетких ограничений необходим для поиска вектора оптимальных управлений, полученного при решении задачи (5). Это позволит осуществлять управление процессом КР с учетом экспертной информации о процессе. Поэтому, сначала необходимо определить оптимум ОКО $J_{opt}(U)$, затем на основе полученных управлений U нужно задать нечеткую цель $\tilde{G}$ и нечеткие ограничения $\tilde{C}_1$, $\tilde{C}_2$, и на основе применения схемы Беллмана – Заде определить вектор оптимальных управлений U^*.

Алгоритмом оптимизации процесса КР будем называть последовательность поиска управлений U в соответствии с постановкой (5). *Алгоритмом управления процессом КР на основе экспертной информации* является процедура поиска оптимальных управлений U^* с учетом нечеткой цели $\tilde{G}$ и нечетких ограничений $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2$. При этом результаты поиска по первому алгоритму являются исходной информацией для второго алгоритма [11].

Разработка системы управления процессом КР необходима для компенсации возмущений. Для упрощения задачи оптимизации процесса рассмотрим такие возмущения, как изменение качества сырья и изменение качества топливного газа.

Все вышеизложенное позволяет выделить основные задачи: выбор методов оптимизации процесса; разработка алгоритма оптимизации процесса; разработка алгоритма управления процессом на основе экспертной информации; оптимизация процесса при изменении качества сырья и качества топливного газа.

Выбор методов оптимизации процесса каталитического риформинга. Оптимизация процесса КР связана с поиском минимума ОКО при наложенных ограничениях (6) и связей в виде ММ (4). Прежде всего необходимо рассмотреть особенности ОКО.

Получим из ММ процесса КР основные выражения для определения ОКО в виде системы (7). Расшифровка обозначений переменных, входящей в систему (8), была приведена в [16].

$$\begin{cases} J = k_1 J_1 + k_2 J_2 = k_1 ON_0 \cdot (1/ON) + (k_2/Z_0) \cdot Z, \\ ON = CGM\,(PR^* \circ R_5) + 0{,}05 \cdot \left(MR_{h/r}\right)^{-3} + \\ \quad + 49 - 14{,}47 \cdot Q_V - 9{,}8 \cdot P, \\ Z = Q_r \cdot \left(a + b \cdot Q_{fg}\right). \end{cases} \quad (7)$$

Система (7) определяет ОКО как линейную комбинацию величины, обратной октановому числу бензина ($1/ON$), и величины производственных затрат Z с соответствующими коэффициентами ($k_1 ON_0$), (k_2/Z_0). При этом в линейную комбинацию входят вещественные функции нескольких переменных $f_1 = 1/ON$, $f_2 = Z$. Необходим выбор методов поиска экстремума функции $J = (k_1 ON_0) f_1 + (k_2/Z_0) f_2$.

Для поиска экстремума функции f_1, представляющей собой дифференцируемую функцию нескольких переменных, достаточно применение методов дифференциального исчисления функций нескольких переменных [13].

В отличие от f_1 функция f_2 является не дифференцируемой в связи с наличием нечетко-логических операций в выражении для определения октанового числа. Поэтому для поиска экстремума функции J возможно использование только методов прямого поиска, не требующих вычисления производных целевой функции. В настоящей работе, как было показано в [16], целевая функция J является мультимодальной. Поэтому рассмотрим возможность использования для решения задачи оптимизации процесса КР поисковых методов: Монте-Карло, Хука – Дживса, Нелдера – Мида, Розенброка, метода сопряженных направлений и т. д. Данные методы являются наиболее совершенными поисковыми методами оптимизации, использующими информацию, полученную на каждом шаге алгоритма, однако преимуществом метода Хука – Дживса по сравнению с остальными поисковыми методами является более быстрая сходимость [10].

Поэтому, для поиска экстремума функции J будет использован метод конфигураций (метод Хука – Дживса). Т.к. в настоящей работе рассматривается задача условной оптимизации, рассмотрена возможность использования методов штрафных функций.

Алгоритм оптимизации процесса каталитического риформинга. Рассмотрим зависимость функции J от двух переменных: расхода сырья u_1 и расхода топливного газа u_2. Необходимо преобразовать систему (7) к виду (8):

$$\begin{cases} J(u_1,u_2) = (k_1 ON_0) f_1(u_1,u_2) + (k_2/Z_0)\, f_2(u_1,u_2), \\ f_1(u_1,u_2) = \begin{pmatrix} CGM(PR^* \circ R_5) + 0{,}05 \cdot (MR_{h/r})^{-3} + \\ +49 - 14{,}47 \cdot Q_V - 9{,}8 \cdot P \end{pmatrix}^{-1}, \\ f_2(u_1,u_2) = u_1 \cdot (a + bu_2), \end{cases} \quad (8)$$

где a, b — постоянные коэффициенты, определяющие стоимость и объем ресурсов на производство бензина, определяемые по формуле (9):

$$a = Q_e \cdot C_e + Q_w \cdot C_w + Q_m \cdot C_m + Q_k \cdot C_k + Q_a \cdot C_a + Q_c \cdot C_c,\ b = C_{fg}. \quad (9)$$

Применительно к настоящей работе опишем стратегию поиска оптимума функции $J(u_1, u_2)$ с использованием метода конфигураций (Хука – Дживса) и метода штрафных функций. Обозначим начальную точку исследующего поиска $u^0 = (u^0_1, u^0_2)$. Поиск будет осуществляться по координатным направлениям: в сторону увеличения (уменьшения) координаты u_1; в сторону увеличения (уменьшения) координаты u_2. Для каждого из координатных направлений задается величина шага Δ, которая может быть переменной в процессе поиска. Зафиксировав первое координатное направление, делаем шаг в сторону увеличения соответствующей координаты. Шаг считается удачным, если значение функции $J(u_1, u_2)$ в пробной точке u^* меньше, чем в начальной точке u^0. В противном случае нужно возвратиться в начальную точку u^0 и сделать шаг в противоположном координатном направлении с последующей проверкой поведения функции $J(u_1, u_2)$. После перебора всех координатных направлений исследующий поиск завершается. При неудачном поиске величина шага уменьшается, и процедура продолжается, пока величина шага не станет меньше заданного значения ε [11].

Графическая интерпретация исследующего поиска экстремума функции $J(u_1, u_2)$ приведена на рис. 3.

Исследующий поиск осуществляется путем движения по направлению от начальной точки u^0 к конечной u^3. С помощью ускоряющего множителя λ задается величина ускоряющего шага. Путем исследующего поиска определяется наилучшая точка u^3, в которой значение функции $J(u_1, u_2)$ меньше, чем в точке предыдущего базиса u^2. На рис. 3 удачный поиск отображен сплошными линиями, неудачный — пунктирными, числами обозначены порождаемые алгоритмом точки.

Представим пошаговое описание алгоритма оптимизации процесса КР на основе метода Хука – Дживса.

Шаг 1. Задаем начальную точку u^0, порог уменьшения шага ε > 0, величина ускоряющего шага λ > 0, начальные значения шагов по координатным направлениям $\Delta_1, \Delta_2 \geq \varepsilon$, величина уменьшения шага α > 1. Положить $v^1 = u^0$, $i = 1$, $k = 0$.

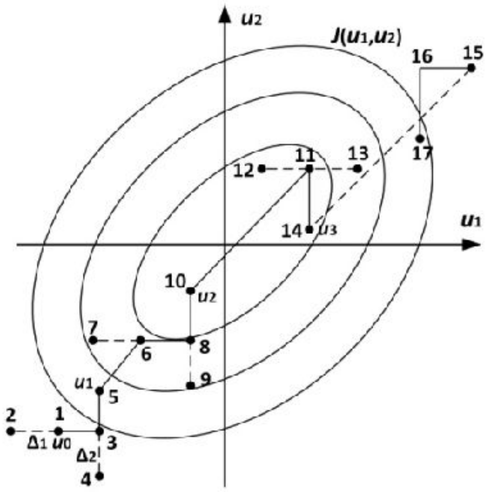

Рис. 3. Исследующий поиск экстремума функции J

Шаг 2. Выполнить исследующий поиск:

а) если $J(v^i + \Delta_i) < J(v^i)$, т. е. $J(v^i_1, v^i_2 + \Delta_2) < J(v^i_1, v^i_2)$, то шаг является удачным. Тогда нужно положить $v^{i+1} = v^i + \Delta_i l_i$, где l_i — стандартный базис;

б) если в п. «а» сделан неудачный шаг, то делаем шаг в противоположном направлении. Если $J(v^i - \Delta_i) < J(v^i)$, т. е. $J(v^i_1, v^i_2 - \Delta_2) < J(v^i_1, v^i_2)$, то шаг является удачным. Тогда нужно положить $v^{i+1} = v^i - \Delta_i l_i$;

в) если в п. «а» и «б» сделаны неудачные шаги, нужно положить $v^{i+1} = v^i$.

Шаг 3. Выполнить проверку условий:

а) если $i < n$, то нужно положить $i = i + 1$ и выполнить переход к шагу 2 для продолжения поиска по оставшимся координатным направлениям;

б) если $i = n$, то нужно выполнить проверку успешности поиска:

– если $J(v^{n+1}) < J(u^k)$, переход к шагу 4;

– если $J(v^{n+1}) \leq J(u^k)$, переход к шагу 5.

Шаг 4. Нужно положить $u^{k+1} = v^{n+1}$, $v^1 = u^{k+1} + \lambda(u^{k+1} - u^k)$, $i = 1$, $k = k + 1$ и выполнить переход к шагу 2.

Шаг 5. Нужно выполнить проверку условия окончания:

а) если для каждого координатного направления $\Delta_i \leq \varepsilon$, то необходимо завершить поиск: $u^* = u^k$;

б) для тех координатных направлений, при которых $\Delta_i > \varepsilon$, необходимо уменьшение величины шага: $\Delta_i = \Delta_i/\alpha$. Нужно положить $v^1 = u^k$, $u^{k+1} = u^k$, $k = k + 1$, $i = 1$ и выполнить переход к шагу 2.

В табл. 1 представлены результаты работы алгоритма оптимизации процесса КР при различных значениях начальных направлений Δ_1, Δ_2.

Таблица 1

Результаты работы алгоритма оптимизации

№ п/п	Δ_1,Δ_2	u^*	$J(u^*)$	N
1	1; 1	(158; 952)	0,962	22
2	1; 0,5	(159; 951)	0,961	20
3	0,5; 1	(160; 950)	0,960	18
4	0,5; 0,5	(161; 949)	0,961	16

Из табл. 1 видно, что изменение значений начальных направлений Δ_1, Δ_2 в два раза практически не повлияло на точность определения точки u^* и значения

$J(u^*)$, но привело к уменьшению необходимого числа N шагов поиска. При заданных значениях начальных направлений Δ_1, Δ_2 уменьшение необходимого числа N шагов поиска можно также достичь, изменив коэффициент уменьшения шага $\alpha > 1$ на этапе исследующего поиска. Так, например, при $\Delta_1 = 1$ $\Delta_2 = 1$ (табл. 1, п/п 1) наименьшее количество шагов достигается при $\alpha = 5$, в то время как при $\alpha = 4$ и $\alpha = 20$ имеем $N = 12$, а при $\alpha = 10$ имеем $N = 15$.

Таким образом, на основе алгоритма оптимизации определен минимум ОКО $J_0 = 0{,}960$ и управления: расход сырья $x_0 = 160$ ($м^3/ч$) и расход топливного газа $y_0 = 950$ ($м^3/ч$). Перейдем к разработке алгоритма управления процессом КР на основе экспертной информации.

Алгоритм управления процессом каталитического риформинга на основе экспертной информации. Необходимо обеспечить повышение эффективности принятия решений при управлении процессом КР на основе применения методов принятия решений в нечетких (расплывчатых) условиях в отношении выбора управляющих воздействий [19]. Для этого был разработан алгоритм управления процессом КР на основе экспертной информации, пошаговое описание которого приведено ниже.

Шаг 1. Задание нечеткой цели и нечетких ограничений в виде словесных высказываний (формулировок).

Нечеткая цель $\tilde{G}$ отражает требование минимума ОКО при оптимизации процесса КР. Использование нечетких ограничений $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2$ объясняется тем, что при управлении процессом КР необходимо поддержание удовлетворительного состояния 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 [20].

Шаг 2. Определение универсального множества управляющих воздействий.

Пусть $Z_{XY} = \{X, Y\}$ — множество управлений. Нечеткая цель $\tilde{G}$ и нечеткие ограничения $\tilde{C}_1$, $\tilde{C}_2$ представляют собой нечеткие множества на универсальном множестве Z_{XY}. Значения универсального множества Z_{XY} определяются величинами управляющих воздействий процесса КР: расхода сырья $x = u_1(x \in X)$ и расхода топливного газа $y = u_2(y \in Y)$. На основе алгоритма оптимизации определяется минимум ОКО $\min J(x, y) = J_0$ и управления: расход сырья $x = x_0$ ($м^3/ч$) и расход топливного газа $y = y_0$ ($м^3/ч$). Регламентом процесса КР устанавливаются диапазоны изменения управлений: расхода сырья $x \in [x_{min};x_{max}]$ ($м^3/ч$), расхода топливного газа $y \in [y_{min};y_{max}]$ ($м^3/ч$) [5].

Шаг 3. Формализация нечеткой цели и нечетких ограничений в виде нечетких множеств на универсальном множестве управляющих воздействий.

Нечеткая цель $\tilde{G}$ представлена нечетким множеством с гауссовой функцией принадлежности (ФП) (10):

$$\mu_G(x, y) = \exp\left(-0{,}01(x - x_0)^2 - 0{,}001(y - y_0)^2\right). \quad (10)$$

С учетом размерности величин x, y выбраны коэффициенты концентрации Гауссовой ФП (10): для расхода сырья x — 0,01, для расхода топливного газа y — 0,001. Данные коэффициенты характеризует степень отклонения значений Гауссовой ФП относительно координат (x_0; y_0), соответствующих минимуму ОКО.

Нечеткое ограничение $\tilde{C}_1$ представлено нечетким множеством с сигмоидной ФП (11):

$$\mu_{C_1}(x, y) = \frac{1}{1 + \exp\left(-0{,}05(x - x_1) - 0{,}005(y - y_1)\right)}. \quad (11)$$

С учетом размерности величин x, y выбраны коэффициенты крутизны сигмоидной ФП (11): для расхода сырья x — 0,05, для расхода топливного газа y — 0,005. Данные коэффициенты характеризует степень изменения значений сигмоидной ФП относительно координат (x_1; y_1), соответствующих экстремуму гауссовой ФП терм-множества ЛП «Активность катализатора AC^* средняя Z» (12):

$$\mu_{AC}(x, y) = \exp\left(-0{,}01(x - x_1)^2 - 0{,}001(y - y_1)^2\right). \quad (12)$$

С учетом размерности величин x, y выбраны коэффициенты концентрации гауссовой ФП (12): для расхода сырья x — 0,01, для расхода топливного газа y — 0,001.

Нечеткое ограничение $\tilde{C}_2$ представлено нечетким множеством с сигмоидной ФП (13):

$$\mu_{C_2}(x, y) = \frac{1}{1 + \exp\left(-0{,}08(x_2 - x) - 0{,}008(y_2 - y)\right)}. \quad (13)$$

С учетом размерности величин x, y выбраны коэффициенты крутизны сигмоидной ФП (13): для расхода сырья x — 0,08, для расхода топливного газа y — 0,008. Значения координат (x_2; y_2) соответствуют максимуму гауссовой ФП терм-множества ЛП «Состояние печи риформинга CF^* среднее Z» (14):

$$\mu_{CF}(x, y) = \exp\left(-0{,}01(x - x_2)^2 - 0{,}001(y - y_2)^2\right). \quad (14)$$

С учетом размерности величин x, y выбраны коэффициенты концентрации гауссовой ФП (14): для расхода сырья x — 0,01, для расхода топливного газа y — 0,001.

Шаг 4. Определение нечеткого решения по схеме Беллмана – Заде в виде нечеткого множества на универсальном множестве управлений.

По схеме Беллмана – Заде нечеткое решение $\tilde{D}$ определяется как нечеткое множество (15) на универсальном множестве Z_{XY} и представляет собой пересечение нечеткой цели $\tilde{G}$ и нечетких ограничений $\tilde{C}_1$, $\tilde{C}_2$:

$$\tilde{D} = \tilde{G} \cap \tilde{C}_1 \cap \tilde{C}_2. \quad (15)$$

Определяем ФП нечеткого решения $\tilde{D}$ (16) как минимум над ФП нечеткой цели $\tilde{G}$ (10) и нечетких ограничений $\tilde{C}_1$, $\tilde{C}_2$ (11), (13):

$$\mu_D(x, y) = \min\left(\mu_G(x, y), \mu_{C_1}(x, y), \mu_{C_2}(x, y)\right). \quad (16)$$

Шаг 5. Определение вектора оптимальных управлений.

Взаимосвязь между нечеткими целью, ограничениями и решением при выборе оптимального расхода сырья показана на рис. 4. Данный рисунок наглядно отражает результат поиска оптимального расхода сырья по схеме Беллмана – Заде [17].

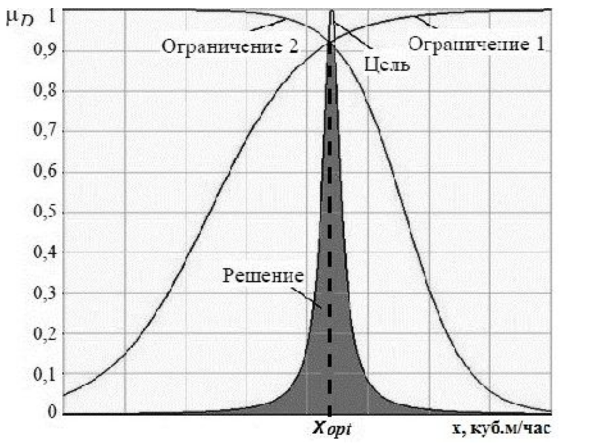

Рис. 4. Поиск оптимальных управлений по схеме Беллмана – Заде

На рис. 4 изображена проекция пересечения поверхностей ФП нечеткой цели и нечетких ограничений на плоскость «ФП нечеткого решения $\mu_D(x)$ – расход сырья x». Аналогично может быть получена проекция пересечения данных поверхностей на плоскость «ФП нечеткого решения $\mu_D(y)$ – расход топливного газа y».

На основе конфликта цели и ограничений при управлении процессом КР получаем область значений ФП $\mu_D(x,y)$ «Решение», соответствующую множеству оптимальных управлений. Из данной области определяем координаты $(x_{opt};y_{opt})$, соответствующие максимуму ФП нечеткого решения (17):

$$\begin{aligned}\mu_D(x_{opt}, y_{opt}) &= \max \mu_D(x, y) = \\ &= \max \min\left(\mu_G(x, y), \mu_{C_1}(x, y), \mu_{C_2}(x, y)\right).\end{aligned} \quad (17)$$

Таким образом, при расходе сырья x_{opt} ($м^3/ч$) и расходе топливного газа y_{opt} ($м^3/ч$) достигается нечеткая цель $\tilde{G}$ при нечетких ограничениях $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2$. В результате алгоритма управления процессом КР на основе экспертной информации получаем вектор оптимальных управлений $U^* = (x_{opt}; y_{opt})^T$.

Если данный алгоритм не имеет решения, для управления процессом КР используется вектор управлений U, полученный в результате алгоритма оптимизации.

С использованием алгоритма управления процессом КР на основе экспертной информации определен вектор оптимальных управлений $U^* = (162;\ 970)^T$ и соответствующее значение ОКО $J = 0{,}966$.

Перейдем к задаче управления процессом КР при изменении качества сырья и качества топливного газа.

Управление процессом каталитического риформинга при изменении качества сырья и качества топливного газа. Качество сырья и топливного газа являются важнейшими параметрами, влияющими на эффективность производства бензина. Ухудшения последних параметров являются возмущениями процесса КР. При ухудшении качества сырья и топливного газа снижается качество выпускаемого топлива. Поэтому необходимо рассмотреть задачу управления процессом КР при ухудшении качества сырья и качества топливного газа. Необходим поиск оптимальных управлений для повышения качества бензина при действующих возмущениях [4]. Степень ухудшения качества сырья и качества топливного газа устанавливает эксперт-оператор. При этом могут быть заданы следующие лингвистические оценки ухудшения качества сырья: «ухудшение качества сырья малое», «ухудшение качества сырья среднее», «ухудшение качества сырья большое». Аналогично задаются лингвистические оценки для ухудшения качества топливного газа.

Рассмотренные лингвистические оценки представляют собой терм-множества нечеткого множества ЛП «Ухудшение качества сырья ΔQR^*», «Ухудшение качества топливного газа ΔQFG^*». Поскольку данные ЛП являются изменениями ЛП «Качество сырья QR^*», «Качество топливного газа QFG^*» используем для описания нечетких множеств гауссову ФП [18].

Приведем формулировку задачи оптимизации процесса КР при ухудшении качества сырья и качества топливного газа. При заданных входных переменных X_{IN} и действующих возмущениях F (ухудшении качества сырья ΔQR^* и ухудшении качества топливного газа ΔQFG^*) найти управляющие воздействия U, обеспечивающие минимум ОКО J (18):

$$J(X_{IN}, U, F) \to \min, \quad (18)$$

при наложенных связях в виде модели (4), ограничениях (6), нечеткой цели $\tilde{G}$ и нечетких ограничениях $\tilde{C}_1$, $\tilde{C}_2$.

Поэтому задача (5) является частным случаем задачи (18) при отсутствии возмущений: ухудшения качества сырья $F_1 = \Delta QR^*$, ухудшения качества топливного газа $F_2 = \Delta QFG^*$.

Качество сырья QR^* и качество топливного газа QFG^* являются параметрами, недоступными измерению обычными средствами, и вводятся в ММ процесса КР в качестве ЛП. Поэтому построение сложных АСР (комбинированных, каскадных и пр.) для компенсации возмущений $F_1 = \Delta QR^*$, $F_2 = \Delta QFG^*$ является трудно реализуемой задачей. Вместо этого предлагается учитывать возмущения $F_1 = \Delta QR^*$, $F_2 = \Delta QFG^*$ как изменения входных переменных $x_{in4} = QR^*$, $x_{in5} = QFG^*$, задаваемых оператором путем лингвистических оценок.

При задании возмущений изменяется вектор входных переменных (19):

$$\begin{aligned} X_{IN} + \Delta X_{IN} = (x_{in1}, x_{in2}, ..., x_{in4} + \Delta x_{in4}, \\ x_{in5} + \Delta x_{in5}, ..., x_{in12}, x_{in13})^T \end{aligned}, \quad (19)$$

где ΔX_{IN} — изменение вектора входных переменных X_{IN}, связанное с изменениями входных переменных: качества сырья $\Delta x_{in4} = \Delta QR^*$, качества топливного газа $\Delta x_{in5} = \Delta QFG^*$.

Поскольку между ЛП невозможно выполнить арифметические операции, установим связь между начальными значениями входных переменных x^0_{in4}, x^0_{in5}, возмущениями Δx_{in4}, Δx_{in5} и новыми значениями входных переменных x_{in4}, x_{in5}. На основе суждений экспертов получен набор правил определения новых значений входных переменных X_{IN} (качества сырья и топливного газа) по начальным значениям X^0_{IN} и возмущениям ΔX_{IN} (табл. 2).

Таблица 2

Правила определения значений входных переменных

		ΔX_{IN}				
		N	*ZN*	*Z*	*ZP*	*P*
X^0_{IN}	*N*	*N*	*N*	*N*	*N*	*N*
	ZN	*ZN*	*N*	*N*	*N*	*N*
	Z	*Z*	*ZN*	*N*	*N*	*N*
	ZP	*ZP*	*Z*	*ZN*	*N*	*N*
	P	*P*	*ZP*	*Z*	*ZN*	*N*

В табл. 2 использованы обозначения величин входных переменных x_{in4}, x_{in5}: *N* — низкое, *ZN* — ниже среднего, *Z* — среднее, *ZP* — выше среднего, *P* — высокое.

Для примера, из табл. 2 можно получить правила: «если начальное качество сырья x^0_{in4} низкое *N*, и ухудшение качества сырья Δx_{in4} высокое *P*, то новое значение качества сырья x_{in4} низкое *N*», «если начальное качество топливного газа x^0_{in5} высокое *P*, и ухудшение качества топливного газа Δx_{in5} выше среднего *ZP*, то новое значение качества топливного газа x_{in5} ниже среднего *ZN*».

Задача управления процессом КР при изменении качества сырья и качества топливного газа заключается в определении нового вектора оптимальных управлений $U + \Delta U$ в зависимости от изменения вектора входных переменных $X_{IN} + \Delta X_{IN}$ на основе разработанных алгоритмов оптимизации и управления процессом КР на основе экспертной информации.

Для возмущений *F* «ухудшение качества сырья низкое *N*», «ухудшение качества топливного газа ниже среднего *ZN*» вычислены оптимальные управления: расход сырья $Q_r = 152$ (м^3/час), расход топливного газа $Q_{fg} = 895$ (м^3/час), ОКО $J = 0{,}971$.

При учете возмущений значение ОКО повышается в среднем на 0,5 % по сравнению с вариантом, при котором отсутствует воздействие возмущений на процесс КР. В целом учет нечетких целей и ограничений при действующих возмущениях позволяет обеспечить эффективное управление процессом КР на основе экспертной информации.

Заключение

1. Выполнена постановка задачи оптимизации процесса КР, отличающаяся использованием ОКО. Выбраны методы оптимизации и управления процессом КР на основе экспертной информации.

2. Разработан алгоритм оптимизации процесса КР на основе метода Хука – Дживса и метода штрафных функций. На основе алгоритма были рассчитаны управления: расход сырья 160 (*м^3/ч*), расход топливного газа 950 (*м^3/ч*), ОКО $J = 0{,}960$.

3. Разработан алгоритм управления процессом КР на основе экспертной информации. На основе алгоритма были вычислены оптимальные управления: расход сырья 162 (*м^3/ч*), расход топливного газа 970 (*м^3/ч*), ОКО $J = 0{,}966$.

4. Поставлена и решена задача оптимизации процесса КР при изменении качества сырья и качества топливного газа. Для возмущений *F* «Ухудшение качества сырья низкое», «Ухудшение качества топливного газа ниже среднего» вычислены уточненные оптимальные управления: расход сырья 152 (*м^3/ч*), расход топливного газа 895 (*м^3/ч*), ОКО $J = 0{,}971$.

Литература

1. Smith J.M. Chemical engineering kinetics. McGrawHill, 1981. 676 p.

2. UOP Platforming Process. Operations Handbook. Illinois, USA: UOP. Des Planies, 1997. 390 p.

3. Gumen M.I. Increasing of the Efficiency of the Riforming LG 35 11/300 // Petroleum Processing and Petrochemistry. 2001. № 11. P. 54–57.

4. Perdih A., Perdih F. Chemical Interpretation of Octane Number // Acta Chim. Slov. 2006. № 53. P. 306-315.

5. Mircea C., Agachi, S., Marimoiu V. Simulation and Model Predictive Control of a UOP Fluid Catalytic Cracking // Chemical Engineering and Processing. 2003. Vol. 42. P. 67.

6. Bochkaryov A.V., Fyodorova O.V. Improving the quality of transient processes in the preliminary hydrotreating unit of catalytic reforming facility // Новаянаука: Проблемыиперспективы. 2016. № 115-2. С. 146-148.

7. Ancheyta J. Modeling and simulation of catalytic reactors for petroleum refining. Wiley, 2011. 528 p.

8. Carla I., Pinheiro C., Joana L. Catalytic Cracking (FCC) Process Modeling, Simulation, and Control // Industrial I Engineering Chemistry Research. 2012. № 51 (1). P. 1-29.

9. Pashayeva B. Mathematical model of the fluid catalytic cracking for work in testing control systems for the cracking plant // Problems of Cybernetics and Informatics: The Third International Conference. September 6-8, 2010, Baku, Azerbaijan. Baku, 2010. Vol. 1. P. 328-331.

10. Литовка Ю.В., Као В.З. Моделирование и оптимизация гальванической ванны с дополнительными катодами // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. 2016. Т. 22, № 1. С. 68-74.

11. Литовка Ю.В., Као В.З., Соловьёв Д.С. Оптимизация гальванической ванны с дополнительными катодами и биполярными электродами // Вестн. Астрах. гос. техн. ун-та. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2016. № 2. С. 7-17.

12. Матвейкин В.Г., Дмитриевский Б.С., Попов Н.С., Дмитриева О.В. Интегрированная модель инновационно-производственной системы // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-а. 2016. Т. 22, № 4. С. 550-558.

13. Матвейкин В.Г., Дмитриевский Б.С., Шатилова А.А. Филина А.С. Семержинский С.Г. Моделирование динамики производственной системы // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. 2014. Т. 20, № 3. С. 452-458.

14. Akulinin E.I., Ishin A.A., Skvortsov S.A., Dvoretsky D.S., Dvoretsky S.I. Mathematical modeling of hydrogen production process by pressure swing adsorption method // Advanced Materials and Technologies. 2017. № 2. P. 38-49.

15. Akulinin E.I., Ishin A.A., Skvortsov S.A., Dvoretsky D.S., Dvoretsky S.I. Optimization of adsorption processes with cyclic variable pressure in gas mixture separation // Advanced Materials and Technologies. 2017. № 3. P. 51-60.

16. Джамбеков А.М.,Щербатов И.А., АнтоновО.В., Проталинский О.М. Расчет эффективности процесса каталитического риформинга с использованием гибридной модели // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2017. № 2. С. 26-33.

17. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях. М.: Мир, 1976. 46 с.

18. Джамбеков А.М. Использование информационных технологий для обеспечения автоматизированного управления процессом каталитического риформинга в условиях неопределенности // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2017. № 2 (38). С. 36-46.

19. Джамбеков А.М.,Щербатов И.А. Оптимальное управление процессом каталитического риформинга бензиновых фракций // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. 2017. Т. 23, № 4. С. 557-571.

20. Джамбеков А.М. Управление процессом каталитического риформинга в условиях неопределенности // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф. Т. 5. СПб., 2017. С. 107-110.

References

1. Smith J.M. Chemical engineering kinetics. McGrawHill, 1981. 676 p.

2. UOP Platforming Process. Operations Handbook. Illinois, USA: UOP. Des Planies, 1997. 390 p.

3. Gumen M.I. Increasing of the Efficiency of the Riforming LG3511/300 // Petroleum Processing and Petrochemistry. 2001. № 11. P. 54-57.

4. Perdih A., Perdih F. Chemical Interpretation of Octane Number // Acta Chim. Slov. 2006. № 53. P. 306-315.

5. Mircea C., Agachi, S., Marimoiu V. Simulation and Model Predictive Control of a UOP Fluid Catalytic Cracking // Chemical Engineering and Processing. 2003. Vol. 42. P. 67.

6. Bochkaryov A.V., Fyodorova O.V. Improving the quality of transient processes in the preliminary hydrotreating unit of catalytic reforming facility // Novaya nauka: Problemy i perspektivy. 2016. № 115-2. P. 146-148.

7. Ancheyta J. Modeling and simulation of catalytic reactors for petroleum refining. Wiley, 2011. 528 p.

8. Carla I., Pinheiro S., Joana L. Catalytic Cracking (FCC) Process Modeling, Simulation, and Control // Industrial I Engineering Chemistry Research. 2012. № 51 (1). P. 1-29.

9. Pashayeva B. Mathematical model of the fluid catalytic cracking for work in testing control systems for the cracking plant // Problems of Cybernetics and Informatics: The Third International Conference. September 6-8, 2010, Baku, Azerbaijan. Baku, 2010. Vol. 1. P. 328-331.

10. Litovka Yu.V., Kao V.Z.Modeling and optimization of a galvanic bath with additional cathodes //TambovUniversity Reports. 2016. T. 22, № 1. P. 68-74.

11. Litovka Yu.V., Kao V.Z., Solovyov D.S.Optimization of galvanic bath with additional cathodes and bipolar electrodes //Vestnik of Astrakhan State Technical University.Series: Management, Computer Science and Informatics. 2016. № 2. P. 7-17.

12. Matvejkin V.G., Dmitrievskij B.S., Popov N.S., Dmitrieva O.V.Integrated model of innovation-production system // TambovUniversity Reports. 2016. T. 22, № 4. P. 550-558.

13. Matvejkin V.G., Dmitrievskij B.S., Shatilova A.A., Filina A.S., Semerzhinskij S.G. Modeling the dynamics of the production system // TambovUniversity Reports. 2014. T. 20, № 3. P. 452-458.

14. Akulinin E.I., Ishin A.A., Skvortsov S.A., Dvoretsky D.S., Dvoretsky S.I. Mathematical modeling of hydrogen production process by pressure swing adsorption method // Advanced Materials and Technologies. 2017. № 2. P. 38-49.

15. Akulinin E.I., Ishin A.A., Skvortsov S.A., Dvoretsky D.S., Dvoretsky S.I. Optimization of adsorption processes with cyclic variable pressure in gas mixture separation // Advanced Materials and Technologies. 2017. № 3. P. 51-60.

16. Dzhambekov A.M., Sherbatov I.A., Antonov O.V., Protalinskij O.M. Calculating the efficiency of the catalytic reforming process using a hybrid model//Automation, telemechanization and communication in the oil industry. 2017. № 2. P. 26-33.

17. Bellman R., Zade L.Decision-making under vague conditions. M.: Mir, 1976. 46p.

18. Dzhambekov A.M.Use of information technologies to provide automated control over the process of catalytic reforming under conditions of uncertainty // Pre-Caspian Journal: Management and High Technologies. 2017. № 2 (38). P. 36-46.

19. Dzhambekov A.M., Sherbatov I.A.Optimum control of the process of catalytic reforming of gasoline fractions // Tambov University Reports. 2017. T. 23, № 4.P. 557-571.

20. Dzhambekov A.M.Control of the process of catalytic reforming under conditions of uncertainty // Matematicheskie metody v tehnike i tehnologiyah: sb. tr. mezhdunar. nauch. konf. T. 5. SPb., 2017. P. 107-110.