

Для цитирования:

Нагиев Г.А., Алиева Ф.А. Оптимальное управление загрузкой установок гидроочистки топлив с учетом меняющейся сернистости поступающего сырья. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2017. Т. 60. Вып. 2. С. 91–97.

For citation:

Nagiev H.A., Alieva F.A. Optimal control with load of devices for hydro purification of fuels taking into account change in sulfur content in incoming row material. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2017. V. 60. N 2. P. 91–97.

УДК: 665.6/.7

Г.А. Нагиев, Ф.А. Алиева

Гасан Али оглы Нагиев (✉)

Отдел «Вычислительной математики и информатики», Институт математики и механики НАН Азербайджана, ул. Б. Вахаб-заде 9, Баку, Азербайджан, AZ1141

E-mail: hasannagiev@gmail.com (✉)

Фируза Аллахкули гызы Алиева

Кафедра информатики, Бакинский государственный университет, ул. Захида Халилова, 23, Баку, Азербайджан, AZ1148

E-mail: f.aliyevainf@mail.ru

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗАГРУЗКОЙ УСТАНОВОК ГИДРООЧИСТКИ ТОПЛИВ С УЧЕТОМ МЕНЯЮЩЕЙСЯ СЕРНИСТОСТИ ПОСТУПАЮЩЕГО СЫРЬЯ

Обсуждается проблема управления скоростью ввода сырья в переработку в промышленных установках гидрообессеривания топлив в связи с большими расхождениями в содержании в нем серы. Показываются основные производственно-логистические причины возникновения динамично меняющихся отклонений от некоторых нормативов по содержанию серы в сырье, вводимом в реактор гидроочистки. Ставится задача выбора такой стратегии управления текущей производительностью, которая является оптимальной с точек зрения как показателя качества гидроочищенности сырья, так и выполнимости планируемого объема переработки топлива. Представлена математическая постановка задачи, которая отличается от обычных задач позиционного управления учетом качественных показателей сырья и ограничений на максимально допустимую мощность установок по переработке сырья. Основное отличие состоит во введении стабилизирующей обратной связи по динамике ресурса потребления, которое реализовано за счет включения некоторой оптимизируемой лагранжевой функции. Связывание этой функции с функцией распределения возмущающего фактора, т.е. с изменчивостью содержания серы в сырье, превращает обычную задачу статической оптимизации в задачу оптимального управления с интегральным ограничением на текущую производительность. Теория оптимального управления располагает для решения поставленной задачи методом последовательных приближений, а также методом имитационного моделирования. С алгоритмической точки зрения наиболее простым способом решения является использование метода имитационного моделирования. «Проигрывание» случайного качества при решении задач подобного содержания задают посредством генераторов случайных чисел. В данной статье с использованием эмпирической математической модели, построенной по данным пассивного наблюдения технологического режима производственной установки, данная задача решается методом имитационного моделирования. Средствами компьютерной симуляции создается система имитации внешнего возмущающего фактора, посредством которого осуществляется синтез стабилизирующей обратной связи по выполнимости объема производства в заданный период. Приводятся некоторые реализации обратной связи, позволяющие произвести анализ и выдачу рекомендаций к успешному решению поставленной задачи оптимального распределения нагрузок в условиях внешних возмущений со стороны каче-

ства сырья. Показывается, что для задач с достаточно длительным интервалом планирования, когда произвольной реализацией случайного возмущения надежно отражены его статистические параметры, программное управление по цепи обратной связи оказывается более успешной и обеспечивающей большую точность оптимальности процесса в целом.

Ключевые слова: гидроочистка топлив, содержание серы в топливе, математическое моделирование, оптимизация технологического режима

UDC: 665.6/.7

Н.А. Nagiev, F.A. Alieva

Hasan A. Nagiev (✉)

Department of Computational Mathematics and Informatics, Institute of Mathematics and Mechanics, Azerbaijan National Academy of Sciences, B. Wakhab -zade st., 9, Baku, AZ1141, Azerbaijan

E-mail: hasannagiev@gmail.com (✉)

Firuza A. Alieva

Department of Informatics, Baku State University, Zahid Khalilov st., 23, Baku, AZ1148, Azerbaijan

E-mail: f.aliyevainf@mail.ru

OPTIMAL CONTROL WITH LOAD OF DEVICES FOR HYDRO PURIFICATION OF FUELS TAKING INTO ACCOUNT CHANGE IN SULFUR CONTENT IN INCOMING RAW MATERIAL

The problem of controlling the speed of introduction of raw materials into processing in industrial plants for hydro desulphurization of fuels connected with considerable differences in their sulphur content is discussed. The main production- and logistic problems of appearance of dynamically changing deviations from a number of norms relating to sulphur content in raw materials being fed into cleansing reactor are presented. The problem of selecting such strategy of controlling the current capacity is stated which is optimal both from the points of view of quality indicator of raw material cleanliness and of realizability of the fuel processing volume being planned. The mathematical statement of the problem is given differing from customary problems of positional control by the consideration of quality indicators of raw materials and limitations on maximally admissible output of plants for raw material processing. The principal difference consists in the introduction of stabilizing feedback concerning consumption resource dynamics which can be realized by means of inclusion of a certain Lagrangian function being optimized. The association of this function with function of perturbing factor distribution, i.e. with changeability of sulphur content in raw material turns a conventional problem of static optimization into the problem of optimal control with integral limitation on the current capacity. For solving the stated problem optimal control, the theory has successive approximation method as well as imitational modeling method. The simplest way of solution from algorithmic point of view is the use of imitational modeling method. The playing out of a random quality in solving similar problems is prescribed through generators of random numbers. This problem is solved in the presented paper by way of imitational modeling method using an empirical mathematical model made on the basis of data of passive observation of process operation of a production plant. With the help of computer simulation means a system of imitating an external perturbing factor is created through which synthesis of stabilizing feedback is made relative to realizability of output volume in the predetermined period. Some realizations of feedback are given permitting to perform analysis and offer recommendations for successful solution of the stated problem of optimal distribution of loads under conditions of external perturbances caused by raw material quality. It is demonstrated that for problems with sufficiently prolonged planning interval. When its statistical parameters are safely protected by an arbitrary realization of a random perturbation, programmed control through feedback circuit proves to be more effective and guarantees higher accuracy of process optimality on the whole.

Key words: fuels hydro treating, sulfur content in the fuel, mathematical modeling, optimization of technological mode

ВВЕДЕНИЕ

Рост производственных мощностей гидрокаталитических процессов на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) связан с экологическими требованиями контроля уровня сернистых соединений в атмосфере, которые с каждым днем оказываются более жесткими [1, 2]. Усиливающийся акцент на критерий сероочистки в задачах управления процессами гидрооблагораживания вакуумных дистиллятов – сырья каталитического крекинга [3] и дизельных топлив [4] также является следствием роста объема добычи высокосернистых нефтей.

В сфере управления производством на НПЗ имеется практика кратковременного снижения производительности установок гидроочистки в целях достижения требуемых нормативов продукции, когда поступающая партия сырья оказывается особенно высокосернистой. Однако, стабилизация глубины сероочистки за счет управления производительностью установки на длительный период, очевидно, невыполнима без учета планового задания по выпуску продукции на этот период. Здесь приобретает важность вопрос учета статистических данных партий перерабатываемых сырьевых ресурсов с точки зрения степени их сернистости. Целью настоящего исследования являлась математическая формулировка и решение задачи оптимального управления по критерию качества выпускаемой продукции с учетом планового задания на объем переработки в течение периода планирования. При этом оказывается необходимым учитывать статистические показатели фактора возмущения, проявляющегося в процессе управления в виде параметра сернистости перерабатываемой партии сырья.

Причин изменения содержания серы в большом диапазоне в сырье нефтеперерабатывающих заводов довольно много, начиная со сложной схемы смешения сортов и поставок нефти, выполняющихся за пределами управленческих функций перерабатывающих предприятий. К числу причин, вызывающих изменения сернистости, надо отнести также компаундирование, которое проходит процесс формирования конкретной марки топлива. Статистическое исследование сырья для получения функции распределения вероятности показателя сернистости на основе конкретных производственных данных предприятия не является сложной задачей. В то же время многофакторность случайного процесса формирования этого параметра – надежный аргумент, чтобы априори принять данную случайную величину как распределенную по нормальному закону Гаусса.

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ

Сформулируем данную задачу в следующем виде.

Пусть имеем некоторую функцию

$$y = F(x, u), \quad (1)$$

которая выражает связь глубины сероочистки y (концентрации серы в переработанном топливе) с содержанием в сырье сернистых соединений x и объемной скоростью u ввода в реактор перерабатываемого углеводородного топлива. При этом особо надо подчеркнуть, что все прочие параметры режима в данном контексте принимаются средненормативными и не включаются в функцию качества (1). Рассмотрим следующую задачу оптимального управления:

$$\begin{aligned} \int_0^T F[x(t), u(t)] dt &\rightarrow \max \\ \int_0^T u(t) dt &= G, \end{aligned} \quad (2)$$

где фактор возмущения (сернистость поступающего сырья) $x(t)$ – случайная функция, с известной функцией плотности распределения $\varphi(x)$. Заданы позиционные ограничения на управление $u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$, временной интервал планирования $0 < t \leq T$, планируемое плановое задание G , а также некоторое положительное число $\gamma = \alpha_1/\alpha_0$, задающее приоритетность как отношение коэффициентов весов α_0, α_1 соответственно критерия оптимальности среднего качества и критерия достижимости величины G к концу периода T .

Рассмотрим следующую задачу максимизации, включающую функцию качества (1), и интегральное ограничение, учитываемое введением обратной связи по отклонению от планируемого объема производства:

$$\begin{aligned} \Phi(x(t), u(t)) = \alpha_0 F[x(t), u(t)] - \alpha_1 \lambda(t) \times \\ \times \left(u(t) - \frac{G - \int_0^t u(t) dt}{T - t} \right)^2 \rightarrow \max; t \in [0, T], \end{aligned} \quad (3)$$

где $\lambda(t)$ варьируемая функция, а весовые коэффициенты α_1, α_0 – составляют взвешенную сумму, т.е. $\alpha_0, \alpha_1 \in (0, 1), \alpha_0 + \alpha_1 = 1$.

Данную математическую конструкцию можно рассмотреть в качестве правила синтеза управления u в темпе появления случайного возму-

щения x , если предварительно решить вариационную задачу поиска оптимальной Лагранжевой функции $\lambda_{opt}(t)$ в связи с функцией распределения этого возмущения $\varphi(x)$.

Далее в процессе управления в моменты t_n ; $n = 1, 2, \dots, N-1$; $t_N = T$, для произвольного t_n управление $u(t_n)$ достаточно связывать с возмущением $x(t_n)$ в силу требования оптимальности функции $\Phi(x(t_n), u(t_n))$, для которого в отличие от (2) имеются только позиционные ограничения на управление $u(t_n)$.

Таким образом, задача нахождения оптимальной стратегии управления скоростью подачи сырья на переработку в связи с содержанием сернистых соединений в сырье приводится к решению задачи определения Лагранжевой стабилизирующей функции $\lambda^{opt}(t)$. Являясь вариационной задачей, ее единственное решение может быть получено в связи с заданной функцией распределения $\varphi(x)$ случайной переменной x и меры предпочтения критериев $\gamma = \alpha_0/\alpha_1$ [5].

С математической точки зрения данную задачу следует отнести к вариационным задачам с интегральным ограничением на варьируемый параметр. Данный тип функционального ограничения приводит к классу задач оптимального управления, поскольку она содержит функцию $\lambda^{opt}(t)$, которую следует определить, решая вариационную задачу.

Теория оптимального управления располагает для решения поставленной задачи методом последовательных приближений, а также методом имитационного моделирования [6]. Особенностью является то, что начальное условие задано в конце временного интервала $0 < t \leq T$, поскольку известно по условию, что:

$$\lambda(T) = \frac{\alpha_0}{\alpha_1} = \gamma \quad (4)$$

С алгоритмической точки зрения наиболее простым способом решения является использование метода имитационного моделирования. «Проигрывание» случайного качества при решении задач подобного содержания задают посредством генераторов случайных чисел $x(t_n)$; $n = \overline{1, N}$; $N = T/h$ с заданной функцией распределения $\varphi(x)$. Программные комплексы решения прикладных математических задач как MATLAB, MATHCAD содержат средства генерирования псевдослучайных последовательностей с заданной функцией распределения (*normrnd*, *pnorm*) [7]. Алгоритм определения оптимальной функции $\lambda^{opt}(t)$, предлагающийся нами, основывается на вычислении эмпирического

математического ожидания оптимального управления в дискретных временных отсчетах интервала $[0, T]$ и синтезе кусочно-линейного приближения искомой функции по критерию максимума стабильности математического ожидания:

Задается случайная последовательность, выражающая изменение качества сырья во времени, вычисляется оптимальная производительность $u^{opt}(t_n)$, обеспечивающая максимум выражения (3), и создается массив статистических данных таких значений с последующим вычислением математического ожидания $M(u^{opt}(t_n))$ по полученному массиву. Кусочно-линейное приближение $\lambda^{opt}(t_k)$ искомой функции $\lambda^{opt}(t)$ выражалось в следующем виде:

$$\lambda = a_k t + b_k; t \in (t_{k-1}, t_k); k = \overline{1, K}$$

$$a_k = (\lambda_k - \lambda_{k-1}) / (t_k - t_{k-1}), b_k = \lambda_{k-1} - a_k x_{k-1}, \quad (5)$$

где $\lambda_k \in \{s \cdot h_\lambda, s = \overline{1, S}\}$, $k = \overline{1, K}$ – числа, задающие множество кусочно-линейных приближений функции $\lambda(t)$. Выбор оптимального варианта $\lambda^{opt}(t_k)$, нами осуществлен на основе критерия стабильности математического ожидания управления, максимизирующего (3):

$$M\{u^{opt}(t_k)\} = const; k = \overline{1, K}. \quad (6)$$

Этот критерий вытекает из условия стационарности и эргодичности [7] случайного фактора $x(t)$: – значение выражения (6) при произвольном числе k не должно меняться с действием возмущения с неизменными во времени вероятностными параметрами.

Эмпирическая математическая модель управления скоростью сырьевого потока и анализ характера решений

Анализ влияния скорости ввода сырья на осредненную степень сероочищенности в выходном потоке нами проведен с использованием производственных данных установки, созданной по проекту ЛЧ-24-2000. Среднестатистические показатели режима функционирования этого производства приводятся ниже:

Характеристика сырья:

- плотность при 20 °С – (0,820-0,855) г/см³;
- фракционный состав – (н.к. – 180 °С), (10% – 215 °С), (50% – 275 °С), (96% – 360 °С);
- содержание серы – (0,8-1,2) % масс;
- содержание смол – до 50 г/100 мл;
- кинематическая вязкость, ν_{20} – (5-6) сСт.

Регламентированные технологические параметры режима:

- расход сырья – (130-210) м³/ч; давление на входе – (4,2-4,5) МПа;

- температура смеси на входе – (370-380) °С;
- расход водородсодержащего газа – (11000-12000) м³/ч;
- расход водорода – (0,40-0,42) % масс.

Статистический материал, охватывающий 220-дневный период эксплуатации установки, содержал данные 54 качеств сырья различного показателя сернистости из диапазона (0,8-1,6) [% масс]. Обработка статистик осуществлялась методом наименьших квадратов. При этом в регрессию включались один параметр выхода – остаточное содержание серы в гидрогенезате и два параметра входа – входная сернистость и расход сырья в реактор гидроочистки. Все прочие параметры качества сырья и параметры режима не выходили за пределы указанных выше диапазонов. Однако эти параметры не были включены в статистику регрессионной обработки данных, следовательно, потерпели сглаживания, способствуя обнаружению общей тенденции только в искомой зависимости. Структура уравнения регрессии была задана эмпирически. После параметрической идентификации искомая зависимость получила следующий вид:

$$y = \frac{0.152}{1.81 + 0.89X^{1.6U}} + 0.122 XU \quad (7)$$

В уравнении (7) отклик системы – остаточное содержание серы в гидрогенезате, выражен в абсолютном значении. Показатель сернистости сырья и объемная скорость его ввода в реактор включены в (7) в виде переменных, приведенных к номиналу, т.е.

$$X = x / x_{nom}; U = u / u_{nom}, \quad (8)$$

где значения $x_{пот} = 0,8\%$; $u_{пот} = 175$ м³/ч соответствуют средним по регламенту.

Уравнение (7) отражает тот эмпирический факт, что с увеличением скорости ввода сырья имеется тенденция роста остаточной серы в гидрогенезате и наблюдается повышенная чувствительность к сернистости сырья (рис. 1).

Проанализированы решения данной задачи для модели (3) при использовании функции нормального распределения

$$\varphi(x) \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(X - \bar{X})^2}{\sigma^2}\right) \quad (9)$$

с параметрами: $\bar{X} = 1.0$; $\sigma = 1.5$. Во всех вычислительных экспериментах неизменными являлись относительные величины: $\theta = 1,0$, $\rho = 1,0$, где $\theta = T/T^*$, $\rho = G/G^*$, T^* , G^* – заданные значения параметров.

Для сравнения решений вначале была построена осцилляция управления $u^{opt}(x,t)$ в связи с возмущением, когда в (3) фигурировала не функция стабилизации, а некоторый коэффициент

$\lambda(t) \equiv 1$. Генерировалась функция возмущения с распределением (9). Число включений осциллирующего элемента в составе этого генератора в течение всего заданного периода T составляло $N = 4000$.

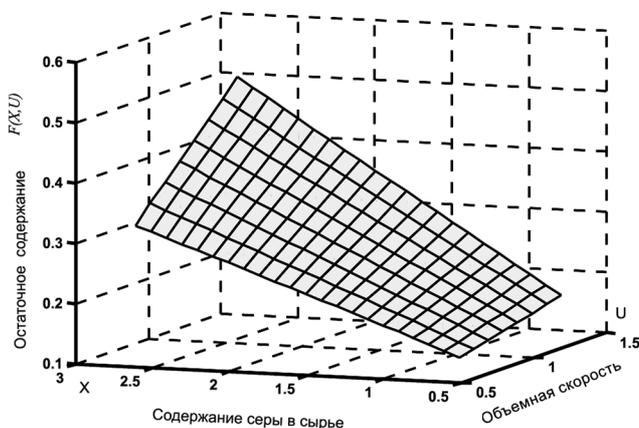


Рис. 1. Графическое представление функции (7) в интервале $0,75 \leq X \leq 2,85$; $0,7 \leq U \leq 1,5$

Fig. 1 Graphic representation of function (7) in the range of $0.75 \leq X \leq 2.85$; $0.7 \leq U \leq 1.5$

Компьютерная осциллограмма функции управления $u(t)$ для этой реализации вычислительного эксперимента показана на рис. 2. По графику замечен тренд возрастания среднего значения управления к концу планового периода $t \rightarrow \theta$.

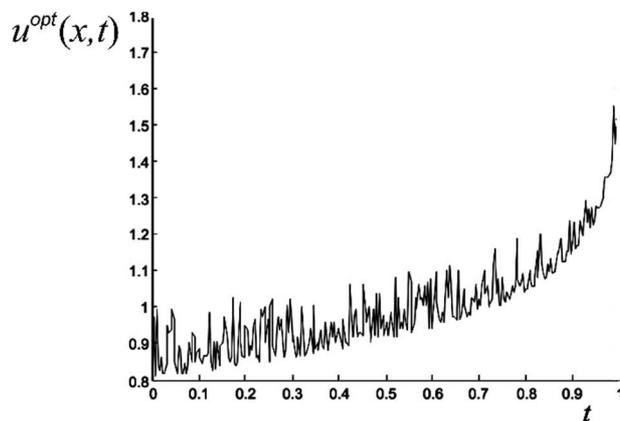


Рис. 2. Компьютерная осциллограмма управления при сигнале от генератора псевдослучайных чисел, с распределением $\varphi(x) \equiv (1/\sqrt{2\pi})e^{-(X-1)/(X-1)}$, когда $\lambda(t) \equiv 1$

Fig. 2 Computer oscillogram of control in case of a signal from generator of pseudorandom numbers with $\varphi(x) \equiv (1/\sqrt{2\pi})e^{-(X-1)/(X-1)}$ distribution at $\lambda(t) \equiv 1$

Этот эффект вызван достаточно ощутимой величиной отрицательного отклонения математического ожидания от среднего значения, т.е. увеличения величины $\frac{G}{T} - M[u^{opt}(x)]$ во времени. Функция эффективности вначале больше чувствительна к

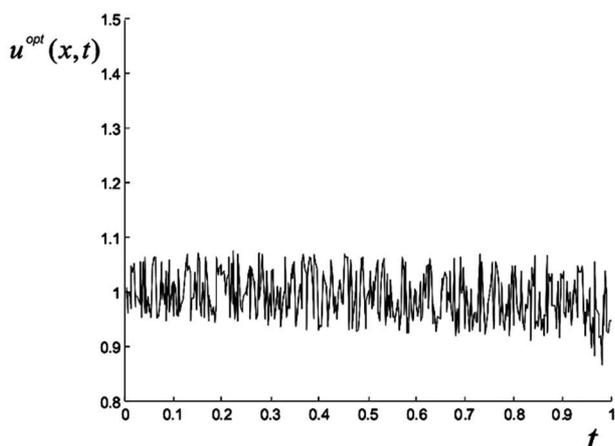


Рис. 3. Осциллограмма управления скоростью ввода сырья на установку при оптимальной стабилизирующей функции $\lambda^{\text{opt}}(t)$

Fig. 3 Control oscillogram of speed of raw material introduction into a device at optimal stabilizing function $\lambda^{\text{opt}}(t)$

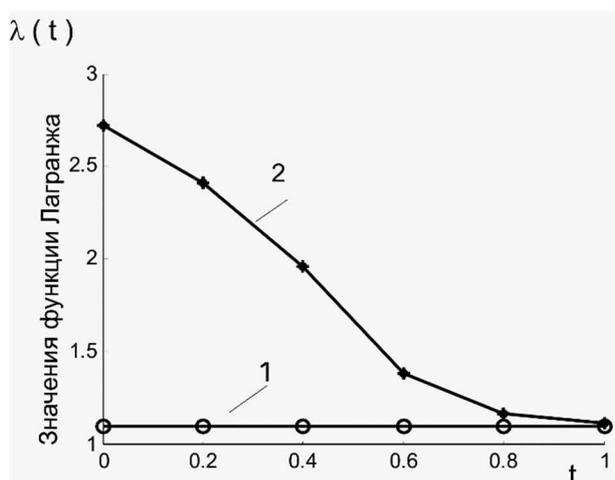


Рис. 4. Численное решение задачи синтеза $\lambda^{\text{opt}}(t)$ для модели (3) при $\varphi(x) \equiv (1/\sqrt{2\pi})e^{-(x-1)(x-1)}$. На графиках: 1 – $\lambda(t) \equiv 1$; 2 – $\lambda(t) = \lambda^{\text{opt}}(t)$

Fig. 4 Numerical solution of problem of $\lambda^{\text{opt}}(t)$ synthesis for model (3) at $\varphi(x) \equiv (1/\sqrt{2\pi})e^{-(x-1)(x-1)}$. On the graphs: 1 – $\lambda(t) \equiv 1$; 2 – $\lambda(t) = \lambda^{\text{opt}}(t)$

показателю качества (остаточного содержания серы), нежели к показателю достижимости планового задания на производство. Об этом свидетельствуют сравнительно высокие амплитуды на начальных и средних участках периода. По мере приближения к

концу периода $t \rightarrow \theta$ за счет больших отклонений от планового задания происходит «наверстывание отставания», а амплитуды осцилляции, наоборот, снижены.

На рис. 3. показан самонастраивающийся процесс, реализованный при помощи синтезированной функции $\lambda^{\text{opt}}(t)$.

График оптимальной стабилизирующей функции представлен на рис. 4.

Как видно, в этом случае достигнута равномерность распределения соотношения критериев оптимальности и достижимости заданного интегрального ограничения, вследствие которой оказывается неизменным среднее значение оптимального управления $u(t)$.

ВЫВОДЫ

Таким образом, задача оптимизации текущей нагрузки установок гидроочистки с учетом сернистости поступающей партии углеводородов, а также планового задания на переработку может быть решена с применением предлагающейся структуры обратной связи. При этом необходим синтез оптимальной стабилизирующей Лагранжевой функции в связи со всеми условиями конкретной задачи, включая функцию распределения внешнего возмущения (сернистости сырья), модели связи остаточного содержания серы со скоростью ввода сырья, области допустимых управлений и весовых коэффициентов приоритетности критериев оптимальности среднего качества и достижимости задания.

Для задач с достаточно длительным интервалом управления, когда произвольной реализацией случайного возмущения надежно отражены его статистические параметры, программное управление по цепи обратной связи будет с большей точностью обеспечивать оптимальность процесса в целом. Критерием оптимальности в данном контексте является снижение среднего остаточного содержания серы, и достижимость задания на объем производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баженов В.П. Тенденции развития российской нефтепереработки. *Химия и технология топлив и масел*. 2002. Т. 38. № 2. С. 3-8.
2. Сулганова Д.Ш., Кантуев А.В. Вопросы интенсификации инновационных процессов на предприятиях нефтеперерабатывающей промышленности. *Вестн. Казанск. технолог. ун-та*. 2006. № 3. С. 226-231.

REFERENCES

1. Bazhenov V.P. Tendencies of development of the Russian oil refining. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*. 2002. V. 38. N 2. P. 3-8 (in Russian).
2. Sultanov D.Sh., Kantuev A.V. The intensification of innovative processes in the petroleum industry. *Bulletin Kazanskogo Tekhnologicheskogo Universiteta*. 2006. N 3. P. 226-231 (in Russian).

3. **Нагиев А.Г., Халилов С.А., Агаев У.Х., Гусейнова А.С.** Самонастраивающаяся система косвенного измерения скорости пневмотранспорта катализатора в реакционно-регенерационных системах химической промышленности. *Автоматизация в промышленности*. 2012. № 12. С. 52-56.
4. **Луговской А.И.** Установки гидроочистки дизельного топлива на Рязанском НПЗ. *Химия и технология топлив и масел*. 2002. № 1. С. 15-17.
5. **Остром К.Ю.** Введение в стохастическую теорию управления. М: Мир. 1973. 321 с.
6. **Лоу А.М., Кельтон В.Д.** Имитационное моделирование. СПб: Питер. 2004. 847 с.
7. **Иглин С.П.** Теория вероятностей и математическая статистика на базе MATLAB. Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ". 2006. 612 с.
3. **Nagiev A.G., Khalilov S.A., Agaev U.Kh., Guseynova A.S.** Self-adjusting indirect measurement system of the catalyst pneumotransport speed in reactor-regenerator systems of chemical industry. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. 2012. N 12. P. 52-56 (in Russian).
4. **Lugovskoiy A.I.** Diesel hydrotreating unit at the Ryazan Refinery. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*. 2002. N 1. P. 15-17 (in Russian).
5. **Åström K.Yu.** Introduction to stochastic control theory. M.: Mir. 1973. 321 p. (in Russian)
6. **Low A.M., Kelton V.D.** Simulation. St.P: Peter. 2004. 847 p. (in Russian).
7. **Iglin S.P.** Probability theory and mathematical statistics based on MATLAB. Kharkiv: Publisher NTU "KPI". 2006. 612 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 23.09.2016
Принята к опубликованию 28.12.2016*

*Received 23.09.2016
Accepted 28.12.2016*