УДК 66.012-52

**С.Н. Кондрашов, А.Е. Пигасов,
Н.И. Берсенёва, А.В. Попова**

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ СЫРЬЯ МЕЖДУ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИМИ УСТАНОВКАМИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА БЕНЗИНОВ

Эффективность функционирования установок каталитического риформинга бензинов в значительной степени определяется качеством управления, при этом большое значение имеет решение проблемы сохранения активности катализатора на протяжении всего межрегенерационного цикла. Термин «активность катализатора» используется для обозначения средневзвешенной температуры на входе реакторов риформинга, при которой должен эксплуатироваться катализатор для получения стабильного катализата с заданным октановым числом по исследовательскому методу. В работе представлены графики фактического изменения активности катализатора риформинга для параллельно работающих установок. В результате аппроксимации представленных зависимостей дезактивации катализатора от количества переработанного сырья получены аналитические выражения, которые могут быть использованы для распределения сырья между установками риформинга.

Для решения задачи необходимо найти такое распределение сырья, при котором суммарное падение активности катализатора по установкам риформинга принимает оптимальное значение при любой заданной совокупности технологических параметров процесса. В работе рассматривается решение этой задачи с использованием метода множителей Лагранжа. На основе данного метода разработан алгоритм управления распределением сырья между параллельно работающими установками каталитического риформинга бензинов с использованием зависимостей изменения активности катализатора от количества переработанного сырья для каждой установки. Он позволяет минимизировать снижение активности катализатора и увеличить его межрегенерационный цикл. Реализация алгоритма выполнена в программной среде Delphi. В работе представлен пользовательский интерфейс в различных режимах работы программы и инструкция пользователя. С использованием данной программы для параллельно работающих установок риформинга выполнен расчет изменения активности катализатора в одном из межрегенерационных циклов.

Результаты расчета в сравнении с фактическими данными, представленные на графиках, показывают, что изменение активности катализатора, рассчитанное методом Лагранжа, по сравнению с фактическим более медленное, что позволяет сохранить активность катализатора в период эксплуатации и увеличить межрегенерационный цикл установок риформинга.

Ключевые слова: *нефтепереработка, установка каталитического риформинга, активность катализатора, межрегенерационный цикл, распределение сырья, температура, октановое число, катализат, метод Лагранжа, алгоритм управления, программная реализация.*

**S.N. Kondrashov, A.E. Pigasov,
N.I. Berseneva, A.V. Popova**

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

MANAGEMENT OF DISTRIBUTION OF RAW MATERIALS BETWEEN PARALLEL NO WORKING THE CATALYTIC REFORMING OF GASOLINE

The efficiency of catalytic reforming of gasoline is largely determined by the quality of governance, thus the great value has the decision of problems of preservation of the activity of the catalyst throughout ipso facto. The term "catalyst activity" is used to indicate the average inlet temperature of the reactors, which must be operated in a catalyst for the preparation of stable catalysate with the required octane number by the research method. The paper presents graphs actual changes in the activity of the catalyst reforming unit for parallel installations. As a result of approximation of dependencies represented by the catalyst deactivation and the number of processors of raw materials by analytical expressions that can be used intended for distribution of raw material between the reforming.

To solve the problem we must find the distribution of raw materials, in which the total fall of the activity of the catalyst for reforming takes an optimal value at any given aggregate technological parameters of the process. In the present paper we solve this problem using the method of Lagrange multipliers. On the basis of this method the algorithm for management of distribution of raw materials between parallel installations of catalytic reforming of gasoline using the dependency of changes in the activity of the catalyst to the amount of recycled materials for each installation, which allows to minimize the decrease in the activity of the catalyst and increase it ipso facto. The implementation of the algorithm executed in the software environment Delphi. The paper presents the user interface

in various modes of operation of the program and the user manual. With the use of this program for parallel reforming the calculation of changes in the activity of the catalyst in one of the inter-reactivation cycles. The results of the calculation in comparison with the actual data presented in the graphs. The results show that changing the activity of the catalyst, calculated by the method of Lagrange, compared to the actual slower, allowing you to maintain the activity of catalyst during the operation and to increase ipso facto the reforming.

Keywords: *oil refining, catalytic reforming unit, the catalyst activity, ipso facto, the distribution of raw materials, temperature, octane number of catalyst, Lagrange's method, control algorithm, programmatic implementation.*

Эффективность функционирования установок каталитического риформинга бензинов, как и любого каталитического процесса, в значительной степени определяется качеством управления, при этом большое значение имеет решение проблемы сохранения активности катализатора на протяжении всего межрегенерационного цикла [1–4].

Термин «активность катализатора» используется для обозначения средневзвешенной температуры на входе реакторов риформинга (WAIT), при которой должен эксплуатироваться данный катализатор для получения стабильного катализата (компонента автомобильного бензина) с заданным октановым числом по исследовательскому методу (ОЧИ).

Для расчета фактической активности катализатора используется показатель «Дельта WAIT», который позволяет нормализовать значения температур реакторов по отношению к следующим показателям установки риформинга: содержание нафтендов и ароматики в сырье, ОЧИ стабильного катализата и объемная скорость подачи сырья LHSV [5, 6]. Этот показатель определяется как разность между температурой WAIT, при которой работает установка риформинга, при заданных значениях трех перечисленных выше параметров, и температурой WAIT для свежего катализатора при тех же самых значениях параметров.

Активность катализатора риформинга зависит от количества переработанного сырья на 1 кг катализатора. Зависимости для параллельно работающих установок № 1–3 представлены на рис. 1.

В результате аппроксимации представленных на рис. 1 зависимостей дезактивации катализатора от количества переработанного

а

б

в

Рис. 1. Изменение активности катализатора установок риформинга № 1–3 (а, б, в соответственно)

сырья с помощью пакета MATLAB и встроенных в него функций $P = \text{polyfit}(X, Y, N)$ и $Y = \text{polyval}(P, X)$, реализующих метод наименьших квадратов, получены следующие аналитические выражения:

$$T_1(\vartheta) = 5,519 \cdot 10^{-11} \vartheta^2 + 2,745 \cdot 10^{-7} \vartheta + (-5,981); \quad (1)$$

$$T_2(\vartheta) = 2,293 \cdot 10^{-11} \vartheta^2 + 2,069 \cdot 10^{-5} \vartheta + (-9,468); \quad (2)$$

$$T_3(\vartheta) = -8,611 \cdot 10^{-13} \vartheta^2 + 2,99 \cdot 10^{-5} \vartheta + (-10,194), \quad (3)$$

где ϑ – количество переработанного сырья, т; $T_1(\vartheta)$, $T_2(\vartheta)$, $T_3(\vartheta)$ – изменение активности катализатора установок риформинга № 1–3, °С.

Задача управления распределением сырья между параллельно работающими установками каталитического риформинга формулируется следующим образом [7].

Необходимо поток сырья V распределить по 3 параллельным установкам. Каждая из установок характеризуется критерием эффективности T_i – падение активности катализатора, причем они не противоречивы, поэтому результирующий критерий эффективности производства

$$R = \sum_{i=1}^3 T_i. \quad (4)$$

Предположим, что эффективность технологического процесса каждой установки зависит от распределения потоков сырья ϑ_i , а также от совокупности технологических параметров процесса:

$$\bar{X}_i = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{qi}), \quad (5)$$

где q – количество регулируемых параметров i -го процесса.

Предполагая, что технологические процессы в реакторах оптимизированы, т.е. параметры технологических процессов не оказывают влияния на распределение потоков сырья, будем считать, что эффективность процесса зависит только от нагрузки агрегата:

$$T_i = T_i(\vartheta_i). \quad (6)$$

Необходимо найти такое распределение сырья ϑ_i , при котором критерий R принимает оптимальное значение при любой заданной совокупности $\bar{x}_i$ (предполагается, что для каждого аппарата в отдельности уже найден оптимальный технологический режим $\bar{X}_i^*$).

Рассмотрим решение этой задачи с использованием метода множителей Лагранжа [8–10].

Целевая функция:

$$R = \sum_{i=1}^3 T_i(\vartheta_i). \quad (7)$$

Ограничения:

$$\vartheta_0 - \sum_{i=1}^3 \vartheta_i = 0. \quad (8)$$

Составляем функцию Лагранжа:

$$L = \sum_{i=1}^3 T_i(\vartheta_i) + \lambda \left(\vartheta_0 - \sum_{i=1}^3 \vartheta_i \right). \quad (8)$$

Дифференцируя L по ϑ_i , находим соотношение

$$\frac{\partial L}{\partial \vartheta_i} = \frac{\partial T_i(\vartheta_i)}{\partial \vartheta_i} - \lambda. \quad (10)$$

Приравняв $\frac{\partial L}{\partial \vartheta_i} = 0$, получим

$$\frac{\partial T_i(\vartheta_i)}{\partial \vartheta_i} = \lambda, \quad i = \overline{1, 3}. \quad (11)$$

Для каждого потока выполняется следующее условие:

$$\frac{\partial T_1(\vartheta_1)}{\partial \vartheta_1} = \frac{\partial T_2(\vartheta_2)}{\partial \vartheta_2} = \frac{\partial T_3(\vartheta_3)}{\partial \vartheta_3}, \quad (12)$$

которое и является условием оптимального распределения материальных потоков.

Для получения численных значений используются аналитические выражения (1–3), характеризующие зависимость падения активности катализатора от расхода сырья для каждой установки.

Программная реализация управления распределением сырья между параллельно работающими установками каталитического риформинга с использованием метода множителей Лагранжа выполнена посредством Borland Delphi. Пользовательский интерфейс программы представлен на рис. 2.

Во вкладке «Входные данные» (см. рис. 2) пользователь вводит исходную информацию:

- общее количество сырья, т;
- начало и конец периода;
- ограничения по загрузке, м³/ч;
- количество переработанного сырья с начала цикла, т;
- потеря активности катализатора по данным расчета, °С.

Рис. 2. Пользовательский интерфейс программы для расчета распределения сырья между установками каталитического риформинга.

Окно «Входные данные»

Для расчета оптимального распределения сырья необходимо нажать кнопку «Выполнить». Программа методом Лагранжа произведет расчет.

Во вкладке «Выходные данные» (рис. 3) пользователь получает информацию:

- плановое количество сырья за период, т;
- загрузки установок по сырью, м³/ч;
- переработанное количество сырья за отчетный период, т;
- переработанное количество сырья с начала цикла, т;
- расчетное падение активности катализатора, °С.

С использованием данной программы для установок риформинга № 1–3 выполнен расчет изменения активности катализатора риформинга в одном из межрегенерационных циклов. Результаты расчета в сравнении с фактическими данными представлены на рис. 4.

Полученные результаты показывают, что изменение активности катализатора, рассчитанное методом Лагранжа, по сравнению с фактическим более медленное, что позволяет сохранить активность катализатора в период эксплуатации и увеличить межрегенерационный цикл установок риформинга.

Необходимо переработать					
100000	тонн сырья за	30 дней			
Загрузки установок по сырью, м³/ч					
35-6/300	35-11/300	35-11/600			
48	37	100			
Переработанное сырье за период, тонн					
25976,662	тонн сырья за 30 дней	20023,338	тонн сырья за 30 дней	54000	тонн сырья за 30 дней
Переработано сырья с начала цикла, тонн					
25976,661664643	20023,338335356	54000			
Расчетное падение активности катализатора, °С					
-5,937168306930	-9,044684902653	-8,581265243571			

Рис. 3. Пользовательский интерфейс программы для расчета распределения сырья между установками каталитического риформинга.
Окно «Выходные данные»

Рис. 4. Фактическое и расчетное изменение активности катализатора установок риформинга № 1–3 (*а*, *б*, *в* соответственно)

Список литературы

1. Плехов В.Г., Шумихин А.Г., Кондрашов С.Н. Разработка и исследование алгоритмов системы управления процессом каталитического риформинга бензиновых фракций // Автоматизация и современные технологии. – 2008. – № 11. – С. 14–21.
2. Применение кинетических констант Аррениуса для оценки состояния активной поверхности бифункционального катализатора окисления меркаптанов / П.В. Безворотный [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2003. – № 6. – С. 12–15.
3. Кравцов А.В., Иванчина Э.Д. Технологические компьютерные системы – новый этап в развитии методов управления процессами переработки углеводородного сырья // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2005. – № 9. – С. 40–43.
4. Имашев У.Б., Тюрин А.А., Удалова Е.А. Особенности развития процесса каталитического риформинга в России // Башкирский химический журнал. – 2009. – Т. 16, № 4. – С. 184–186.
5. Плехов В.Г., Кондрашов С.Н., Шумихин А.Г. Применение многоуровневой математической модели каталитического риформинга бензиновых фракций в системе управления промышленными установками // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 7. – С. 37–42.
6. Мониторинг установки каталитического риформинга бензинов Ачинского НПЗ с использованием компьютерной моделирующей системы / А.Г. Каракулов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322, № 3. – С. 32–34.
7. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах: учеб. пособие. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2005. – 544 с.
8. Гартман Т.Н., Клушин Д.В. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов: учеб. пособие для вузов. – М.: Академкнига, 2006. – 416 с.
9. Гершкович Ю.Б., Широков К.А. Применение пакета MATLAB для решения нелинейных задач оптимизации градиентными методами: метод. указания / РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – М., 2009. – 32 с.
10. Бояринов А.И., Кафаров В.В. Методы оптимизации в химической технологии. – М.: Химия, 1975. – 575 с.

References

1. Plekhov V.G., Shumikhin A.G., Kondrashov S.N. Razrabotka i issledovanie algoritmov sistemy upravleniya protsessom kataliticheskogo riforminga benzinovykh fraktsij [Development and research of algorithms of process control system for catalytic reforming of gasoline fractions]. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii*, 2008, no. 11, pp. 14–21.
2. Bezvorotnyj P.V. [et al.]. Primenenie kineticheskikh konstant Arreniusa dlya otsenki sostoyaniya aktivnoj poverkhnosti bifunktsionalnogo katalizatora okisleniya merkaptanov [The use of kinetic constants by the Arrhenius factor to assess the state of the active surface of a bifunctional catalyst for the oxidation of mercaptans]. *Neftepererabotka i neftekhimiya*, 2003, no. 6, pp. 12–15.
3. Kravtsov A.V., Ivanchina E.D. Tekhnologicheskie kompyuternye sistemy – novyj etap v razvitii metodov upravleniya protsessami pererabotki uglevodorodnogo syrya [Technological computer systems – a new stage in the development of methods of management of processes of hydrocarbon processing]. *Neftepererabotka i neftekhimiya*, 2005, no. 9, pp. 40–43.
4. Imashev U.B., Tyurin A.A., Udalova E.A. Osobennosti razvitiya protsessa kataliticheskogo riforminga v Rossii [Features of the development of catalytic reforming process in Russia]. *Bashkirskij khimicheskij zhurnal*, 2009, vol. 16, no. 4, pp. 184–186.
5. Plekhov V.G., Kondrashov S.N., Shumikhin A.G. Primenenie mnogourovnevoj matematicheskoy modeli kataliticheskogo riforminga benzinovykh fraktsij v sisteme upravleniya promyshlennymi ustanovkami [The use of multi-level mathematical model of catalytic reforming of gasoline fractions in the control system of industrial unit]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2009, no. 7, pp. 37–42.
6. Karakulov A.G. [et al.] Monitoring ustanovki kataliticheskogo riforminga benzinov Achinskogo NPZ s ispolzovaniem komp'yuternoj modeliruyushchej sistemy [The monitoring of catalytic reforming unit of gasoline Achinsk OPP with the use of computer modeling system]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 322, no. 3, pp. 32–34.
7. Panteleev A.V., Letova T.A. Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh [Optimization methods in examples and tasks]. Moscow: Vysshaya shkola, 2005. 544 p.
8. Gartman T.N., Klushin D.V. Osnovy kompyuternogo modelirovaniya khimiko-tekhnologicheskikh protsessov [Computer simulation of chemical technological processes]. Moscow: Akademkniga, 2006. 416 p.

9. Gershkovich Yu.B., Shirokov K.A. *Primenenie paketa MATLAB dlya resheniya nelinejnykh zadach optimizatsii gradientnymi metodami* [The use of the package MATLAB for solving nonlinear optimization problems gradient-governmental methods]. Moscow: Neft i gaz, 2009. 32 p.

10. Boyarinov A.I., Kafarov V.V. *Metody optimizatsii v khimicheskoy tekhnologii* [Optimization methods in chemical technology]. Moscow: Khimiya, 1975. 575 p.

Получено 29.03.2016

Об авторах

Кондрашов Сергей Николаевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета (614013, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, 9, корпус Б; e-mail: Sergej.Kondrashov@pnos.lukoil.com).

Пигасов Андрей Евгеньевич (Пермь, Россия) – магистрант кафедры автоматизации технологических процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета (614013, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, 9, корпус Б; e-mail: a.pigasov@gmail.com).

Берсенёва Наталья Ивановна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры автоматизации технологических процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета (614013, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, 9, корпус Б; e-mail: Natalja.Berse-neva@pnos.lukoil.com).

Попова Анна Валерьевна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры автоматизации технологических процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета (614013, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, 9, корпус Б; e-mail: An.Popova@outlook.com).

About the authors

Sergej N. Kondrashov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University (9, Building B, Professor Pozdeev str., 614013, Perm, Russian Federation; e-mail: Sergej.Kondrashov@pnos.lukoil.com).

Andrej E. Pigasov (Perm, Russian Federation) – Undergraduate Student, Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University (9, Building B, Professor Pozdeev str., 614013, Perm, Russian Federation; e-mail: a.pigasov@gmail.com).

Natalya I. Berseneva (Perm, Russian Federation) – Undergraduate Student, Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University (9, Building B, Professor Pozdeev str., 614013, Perm, Russian Federation; e-mail: Natalja.Berseneva@pnos.lukoil.com).

Anna V. Popova (Perm, Russian Federation) – Undergraduate Student, Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University (9, Building B, Professor Pozdeev str., 614013, Perm, Russian Federation; e-mail: An.Popova@outlook.com).