

## Идентификация математической модели реакторного блока каталитического риформинга по поведению реального объекта

Ю. В. Шариков, И. В. Ткачев, Н. В. Снегирев

Санкт-Петербургский горный университет  
199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2  
e-mail: tka4ev.ilia@yandex.ru

*Аннотация.* Рассматривается вопрос идентификации математической модели, имитирующей технологический процесс блока каталитического риформинга. Структурная и параметрическая идентификация проводится по квази-экспериментальным данным, описывающим фазовую траекторию движения объекта управления в фазовом пространстве динамической системы. Показано успешное применение инженерного подхода в описании сложного технологического процесса с помощью экспериментально-аналитического метода разработки предикативной модели.

*Ключевые слова:* структурная идентификация, параметрическая идентификация, математическая модель, пространство состояний.

### 1. Введение

Формализованное описание объекта исследования требует определения вида математической модели. Детерминированные (аналитические) модели технологических процессов универсальны и имеют широкий интервал адекватности, что позволяет уточнять их до необходимой степени сходимости и точности по ключевым параметрам с реальным объектом. Сложные технологические процессы, трудно поддающиеся описанию, уточняют по экспериментальным данным, предварительно определив классовость создаваемой математической модели для выбора методов параметрической идентификации [1–4].

Каталитический риформинг — это химический процесс, используемый для превращения нефти, в частности, низкооктанового прямогонного лигроина в высокооктановый бензин. Помимо производства высокооктанового бензина, каталитический риформинг также является основным источником ароматических соединений, используемых в нефтехимической промышленности [5].

Имитационную модель процессов реакторного блока каталитического риформинга часто классифицируют по Л. А. Растригину как динамическую, нелинейную, детерминированную и непрерывную, что делает процесс ее разработки нетривиальным, но в тоже время создает высокую прогнозирующую способность и позволяет учесть факторы недоступные для измерений [6–8].

Использование инженерного подхода в получении имитационной модели экспериментально-аналитическим методом по технологическим параметрам и временным рядам, описывающим поведение реального объекта, позволяет получить техническое решение для конкретной производственной задачи [9].

## 2. Методология

Априорная модель создается на основе типовых технологической схемы, технологического регламента установки каталитического риформинга и экспериментальных данных по химической кинетике реакций, протекающих в адиабатических реакторах идеального вытеснения. Модель реакторного узла каталитического риформинга состоит из каскада реакторов с промежуточным подогревом сырья и описывается с использованием системы дифференциальных уравнений первого порядка. Модифицируя гидродинамическую модель реактора идеального вытеснения путем добавления в уравнение материального баланса слагаемого, учитывающего скорость химической реакции, получим:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -u \frac{\partial c_i}{\partial l} + w_{i,j}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \sum \frac{\Delta H_j r_j}{G_f C_p}, \quad (2)$$

где  $c_i$  — концентрация  $i$ -го компонента;  $w_{i,j}$  — скорость расхода (или образования)  $i$ -го компонента в  $j$ -ой реакции;  $\Delta H_j$  — тепловой эффект  $j$ -ой реакции;  $T$  — температура в реакционной зоне;  $l$  — длина слоя катализатора;  $C_p$  — теплоемкость с учетом состава и температуры в данной точке;  $G_f$  — массовый расход, отнесенный к площади поперечного сечения реактора;  $r_j$  — приращение  $j$ -го компонента.

Одним из этапов разработки аналитической модели является ее структурная идентификация, в процессе которой определяется степень полноты детализации, упрощений или допущений. Созданная гомогенная модель в IDE Spyder, включающая стандартный набор целевых и побочных реакций по углеводородам C6–C7, может быть уточнена по геометрии реакторов и катализатора, набору реакций, теплообменной обвязке, перепаду давления, способу ввода сырья в реактор в соответствии с требованиями, предъявляемыми к разрабатываемой модели.

Поведение реального объекта на входе и выходе описывают показания датчиков, формирующие исторические данные по ключевым параметрам технологического процесса. Используя IDE Spyder, с помощью библиотеки Mimesis генерируются входные квази-экспериментальные данные, имитирующие показания датчиков по составу и термодинамическим параметрам реального объекта по всему рабочему диапазону реакторного блока, установленному в типовом технологическом

регламенте установки каталитического риформинга. За выходные исторические данные реального объекта принимаются расчетные значения эквивалентной модели, созданной в программном пакете Aspen Plus, в основе которой лежит кинетическая модель процесса и модель идеального вытеснения, дополненная фазовыми равновесиями и теплообменом в соответствии с методикой компании Aspen Technology, полученные путем расчета модели по входным квази-экспериментальным данным с использованием COM interface.

По выходным термодинамическим параметрам и групповому составу производится визуальная оценка рассогласования модели и реального объекта на произвольно выбранном временном участке. Для более точной оценки адекватности и точности имитационной модели можно использовать среднеквадратическое отклонение при сравнении выходных данных реального объекта (RO Out) и модели (M Out).

### 3. Результаты и обсуждения

На рисунках ниже представлены графики сравнения выходных значений продуктовых потоков каждого из трех реакторов идеального вытеснения (PFR) за случайный временной интервал в пять суток.

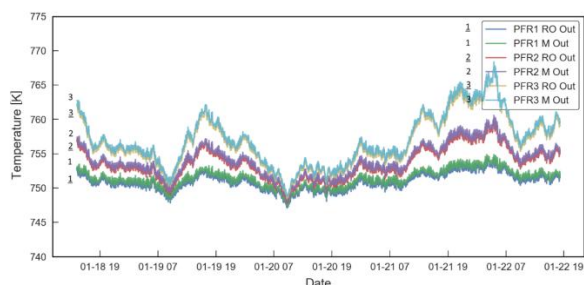


Рисунок 1. Сравнение изменения температур продуктовых потоков реакторов

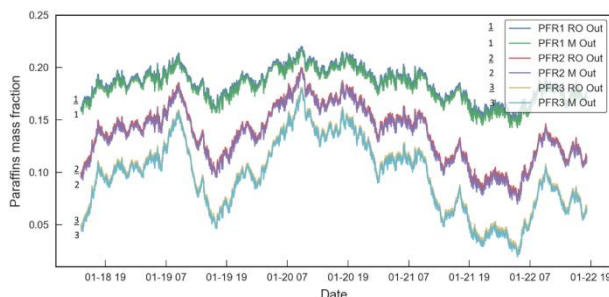


Рисунок 2. Сравнение изменения содержания парафинов в продуктовых потоках реакторов

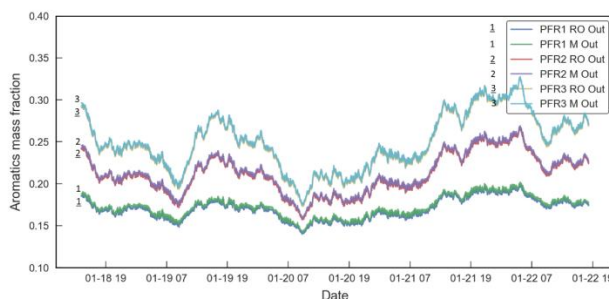


Рисунок 3. Сравнение изменения содержания ароматики в продуктовых потоках реакторов

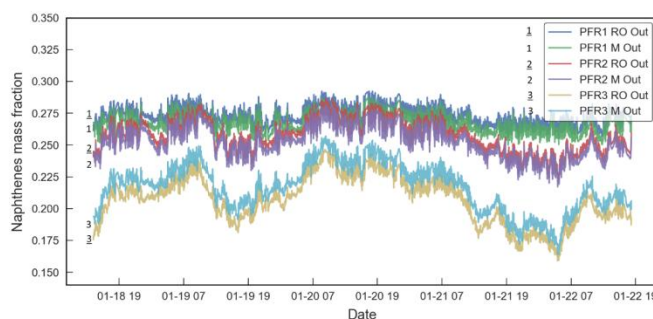


Рисунок 4. Сравнение изменения содержания нафтенов в продуктовых потоках реакторов

Представленные графики демонстрируют, что рассматриваемая динамическая модель эквивалента реальному объекту в каждый момент времени при изменении входных параметров, таких как: расход, давление, температура и состав потока питания. При идентификации модели по поведению реального объекта, имитационная модель учитывает возмущения и их компенсацию, отраженную в исторических данных реального объекта, тем самым достигается высокая прогнозирующая способность модели, что позволяет использовать разработанную модель как элемент системы управления. Реальный объект и модель имеют одинаковые тренды по соответствующим рассматриваемым параметрам на выходе и низкое значение рассогласования, не более 2%.

#### 4. Выводы

1. Анализ методов идентификации имитационных моделей сложных технологических процессов показал возможность использования идентификации модели по поведению реального объекта для создания его прогнозирующей модели.

2. Для разработки имитационной модели объекта управления возможно использование квази-экспериментальных данных имитирующих поведение реального объекта на основе экспериментальных данных.

## Литература

- [1] *Fahim M. A., Alsahhaf T. A., Elkilani A., Fahim M. A., Alsahhaf T. A., Elkilani A.* Catalytic Reforming and Isomerization // In book: *Fundam. Pet. Refin.* 2010. P. 95–122. doi:10.1016/B978-0-444-52785-1.00005-X
- [2] *Ivanchina E. D., Sharova E. S., Syskina A. A., Yakupova I. V.* Computer Modelling System Application for Catalytic Reforming Unit Work Optimisation // *Procedia Chem.*, 2014. No. 10. P. 192–196. doi:10.1016/j.proche.2014.10.033
- [3] *Rodríguez M. A.* Detailed description of kinetic and reactor modeling for naphtha catalytic reforming // *Fuel.* 2011. No. 90. P. 3492–3508. doi:10.1016/J.FUEL.2011.05.022
- [4] *Elsayed H. A., Menoufy M. F., Shaban S. A., Ahmed H. S., Heakal B. H.* Optimization of the reaction parameters of heavy naphtha reforming process using Pt-Re/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst system // *Egypt. J. Pet.* 2017. Vol. 26. No. 4. 885–893. doi:10.1016/J.EJPE.2015.03.009
- [5] *Ancheyta J.* Modeling and Simulation of Catalytic Reactors for Petroleum Refining. — Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2011. doi:10.1002/9780470933565.
- [6] *Tri Chandra S. W., Nordin S., Karsiti M. N.* System identification of an interacting series process for real-time model predictive control // *Proc. Am. Control Conf.* 2009. P. 4384–4389. doi:10.1109/ACC.2009.5160239
- [7] *Abbas S. Z., Dupont V., Mahmud T.* Kinetics study and modelling of steam methane reforming process over a NiO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst in an adiabatic packed bed reactor // *International Journal Hydrogen Energy.* 2017. Vol. 42. No. 5. P. 2889–2903. doi:10.1016/j.ijhydene.2016.11.093
- [8] *Matzopoulos M.* Dynamic Process Modeling: Combining Models and Experimental Data to Solve Industrial Problems // In *Process Syst. Eng.* — Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2014: P. 1–33. doi:10.1002/9783527631209.ch61
- [9] *Sharikov F., Sharikov I.* Development of an optimal control scheme for the process of epoxy resins modification with a complicated mathematical model in the control loop. // *J. Chem. Technol. Appl.* 2017. Vol. 1. No. 1. P. 1–6.

### Авторы:

*Юрий Васильевич Шариков* — доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизации технологических процессов и производств», Санкт-Петербургский горный университет

*Илья Владимирович Ткачев* — аспирант кафедры «Автоматизации технологических процессов и производств», Санкт-Петербургский горный университет

*Никита Викторович Снегирев* — аспирант кафедры «Автоматизации технологических процессов и производств», Санкт-Петербургский горный университет

---

## Identification mathematical model of catalytic reforming reactor unit by the real object behavior

Yu. V. Sharikov, I. V. Tkachev, N. V. Snegirev

St. Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Line 21 of the VO, 2  
e-mail: tka4ev.ilia@yandex.ru

*Abstract.* The issue of identifying mathematical model that simulates the process of catalytic reformer unit is considered. Structural and parametric identification is based on quasi-experimental data describing the phase trajectory of the control object in the phase space of a dynamic system. The successful application of the engineering approach in the description of a complex technological process using an experimental-analytical method for developing a predicative model is shown.

*Key words:* structural identification, parametric identification, mathematical model, state space.

### References

- [1] Fahim M. A., Alsahhaf T. A., Elkilani A., Fahim M. A., Alsahhaf T. A., Elkilani A. (2010) Catalytic Reforming and Isomerization. In *Fundam. Pet. Refin.* P. 95–122. doi:10.1016/B978-0-444-52785-1.00005-X
- [2] Ivanchina E. D., Sharova E. S., Syskina A. A., Yakupova I. V. (2014) *Procedia Chem.*, **10**:192–196. doi:10.1016/j.proche.2014.10.033
- [3] Rodríguez M. A. (2011) *Fuel.*, **90**:3492–3508. doi:10.1016/J.FUEL.2011.05.022
- [4] Elsayed H. A., Menoufy M. F., Shaban S. A., Ahmed H. S., Heakal B. H. (2017) *Egypt. J. Pet.*, **26**(4):885–893. doi:10.1016/J.EJPE.2015.03.009
- [5] Ancheyta J. (2011) *Modeling and Simulation of Catalytic Reactors for Petroleum Refining.* John Wiley & Sons, Inc., doi:10.1002/9780470933565.
- [6] Tri Chandra S. W., Nordin S., Karsiti M. N. (2009) System identification of an interacting series process for real-time model predictive control. In *Proc. Am. Control Conf.* P. 4384–4389. doi:10.1109/ACC.2009.5160239
- [7] Abbas S. Z., Dupont V., Mahmud T. (2017) *Int. J. Hydrogen Energy.* **42**(5):2889–2903. doi:10.1016/j.ijhydene.2016.11.093
- [8] Matzopoulos M. (2014) *Dynamic Process Modeling: Combining Models and Experimental Data to Solve Industrial Problems.* In *Process Syst. Eng.* Wiley, P. 1–33. doi:10.1002/9783527631209.ch61
- [9] Sharikov F., Sharikov I. (2017) *J. Chem. Technol. Appl.* **1**(1):1–6. <http://www.alliedacademies.org/abstract/development-of-an-optimal-control-scheme-for-the-process-of-epoxy-resins-modification-with-a-complicated-mathematical-model-in-the-8421.html>