

УДК 665.64

**РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ
КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛИРУЮЩИХ
СИСТЕМ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО
МОНИТОРИНГА РАБОТЫ УСТАНОВОК
КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА
БЕНЗИНОВ**

В.В. Дериглазов, С.А. Фалеев*, Э.Д. Иванчина

Томский политехнический университет
*ПО «Киришинефтеоргсинтез», г. Кириши
E-mail: DeriglazovVV@gmail.com

Дериглазов Владислав Викторович, магистрант кафедры химической технологии топлива и химической кибернетики Института природных ресурсов ТПУ.

E-mail:

DeriglazovVV@gmail.com

Область научных интересов: химическая технология, гетерогенный катализ, технология нефти и газа, математическое моделирование каталитического риформинга углеводородов.

Фалеев Сергей Александрович, начальник установки Л-35-11/600 ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез», г. Кириши Ленинградской обл.

E-mail: Faleev_S_A@kinef.ru

Область научных интересов: математическое моделирование химико-технологических процессов.

Иванчина Эмилия Дмитриевна, д-р техн. наук, профессор кафедры химической технологии топлива Института природных ресурсов ТПУ.

E-mail: ied@zmail.ru

Область научных интересов: математическое моделирование и системный анализ процессов переработки углеводородного сырья, моделирование процессов, протекающих на поверхности Pt-катализаторов.

Показано, что метод математического моделирования позволяет решить проблему повышения ресурсоэффективности процессов нефтепереработки. Программный продукт «Система контроля работы катализатора» использован для мониторинга каталитического риформинга. Показано, что поддержание оптимальной каталитической активности обеспечивает увеличение селективности процесса. С использованием моделирующей системы можно проводить выбор оптимальной технологической схемы этого процесса.

Ключевые слова:

Каталитический риформинг, мониторинг, математическое моделирование, активность катализатора, рабочий цикл, ресурсосбережение.

Повышение ресурсоэффективности – одна из наиболее значимых проблем нефтепереработки, которая возникает из-за низкого показателя глубины переработки углеводородного сырья в России. Решить эту проблему можно с использованием метода математического моделирования и системного анализа, которые конкретно реализуются через внедрение систем моделирования [1, 2].

Однако необходимо четко разделять системы моделирования по их сущности. Естественно, что наибольшей надежностью обладают модели, разработанные на основе механизма и кинетики превращения углеводородов на поверхности катализатора. На практике, к сожалению, очень часто используются формализованные математические модели, выполненные на основе статистической обработки фактической информации. Эти системы не могут быть применены для прогнозирования ресурсоэффективности промышленного процесса в динамике [3]. В качестве примера можно назвать широко рекламируемые программы «PIMS», «СОКР», «БЕЛРИФ» и др. Такие системы применяют и на промышленных предприятиях. Система «СОКР» используется для описания работы секции 200 комплекса ЛК-6У Мозырского нефтеперерабатывающего завода. Но из [4] становится ясно, что данная система не обладает прогностической функцией, и в основе ее лежит статистическая модель процесса. Напротив, в компьютерной системе фирмы «Профиматикс» реализованы формализованные закономерности технологии, устанавливаемые по результатам испытаний с использованием математического оптимизатора. Вместе с тем, в ней не используется база данных

званные математические модели, выполненные на основе статистической обработки фактической информации. Эти системы не могут быть применены для прогнозирования ресурсоэффективности промышленного процесса в динамике [3]. В качестве примера можно назвать широко рекламируемые программы «PIMS», «СОКР», «БЕЛРИФ» и др. Такие системы применяют и на промышленных предприятиях. Система «СОКР» используется для описания работы секции 200 комплекса ЛК-6У Мозырского нефтеперерабатывающего завода. Но из [4] становится ясно, что данная система не обладает прогностической функцией, и в основе ее лежит статистическая модель процесса. Напротив, в компьютерной системе фирмы «Профиматикс» реализованы формализованные закономерности технологии, устанавливаемые по результатам испытаний с использованием математического оптимизатора. Вместе с тем, в ней не используется база данных

по катализаторам и, соответственно, не осуществляется тестирование и выбор контакта, а также прогнозирование его технологических показателей в процессе промышленной эксплуатации [5].

Компьютерной моделирующей системой (КМС), способной решить вышеперечисленные задачи является «Система контроля работы катализатора», разработанная на кафедре химической технологии топлива и химической кибернетики Томского политехнического университета [6]. Главный принцип ее реализации – химическое равновесие реакций коксообразования и гидрирования промежуточных продуктов уплотнения, что обеспечивает оптимальность работы катализатора, длительность сырьевого цикла и, как следствие, ресурсоэффективность процесса.

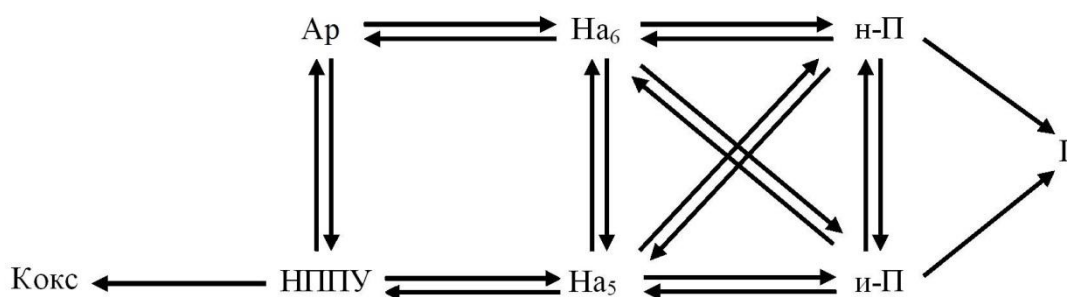


Рис. 1. Формализованная схема превращений для углеводородов C_8-C_{12} : Г – газ; н-П – нормальные парафины; и-П – изопарафины; Na_6 – циклогексаны; Na_5 – циклопентаны; Ар – ароматические углеводороды; НППУ – неопределенные промежуточные продукты уплотнения

На рис. 1 показано, что возможно существование равновесия реакции образования и гидрирования неопределенных промежуточных продуктов уплотнения, а значит, при определенных условиях образование кокса не происходит, т. к. его предшественники – смолы, асфальтены либо гидрируются до углеводородов, либо находятся в равновесии с газофазной реакционной средой. Таким образом, регулируя температуру ввода сырья в реактор, можно обеспечить такой режим ведения процесса, при котором будет существовать равновесие реакции образования коксогенных структур и их гидрирования. Но на практике это трудно реализовать, т. к. требуется получить конечный продукт заданного качества с высоким октановым числом, поэтому возникает объективная необходимость отклонения от термодинамического равновесия. В результате происходит накопление неопределенных продуктов уплотнения. Однако именно на этом противоречии основывается решение очень важной промышленной задачи – подбор нужного катализатора [7].

Математическая модель каталитического риформинга представляет собой систему уравнений материального и теплового балансов:

$$\begin{cases} G \left(\frac{\partial C_i}{\partial z} + \frac{\partial C_i}{\partial V} \right) = \sum_{j=1}^m W_j \\ G \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial V} \right) = -\frac{1}{C_p^{cm}} \sum_{j=1}^m Q_j \end{cases}$$

Начальные условия: $z = 0$, $C_i = 0$, $T = 0$, $V = 0$, $C_i = C_{вх}$, $T = T_{вх}$, где C_i – концентрация i -го реагента на входе в реактор, моль/м³; T – температура; z – суммарный объем переработанного сырья, м³; W_j – скорость j -й реакции; V – объем катализатора, м³; G – объемный расход сырья, м³/ч; Q – тепловой эффект j -й реакции, Дж/моль; C_p^{cm} – теплоемкость смеси, Дж/моль.

ЛЧ-35-11/1000 является установкой риформинга большой единичной мощности. Pt-Re катализатор RG-492 был загружен в первый реактор риформинга и RG-582 – во второй и третий реакторы. Установка работает по бензиновому варианту, катализатор эксплуатируется с 1999 г. В 2006 г. на данной установке была внедрена система контроля работы катализатора и интегрирована в общезаводскую статистическую базу данных ЕТВД. Схема внутренней архитектуры данной системы контроля катализатора представлена на рис. 2.

Таким образом, нестационарная кинетическая модель процесса каталитического риформинга и статистическая база рассматриваются как единый информационно-моделирующий блок.

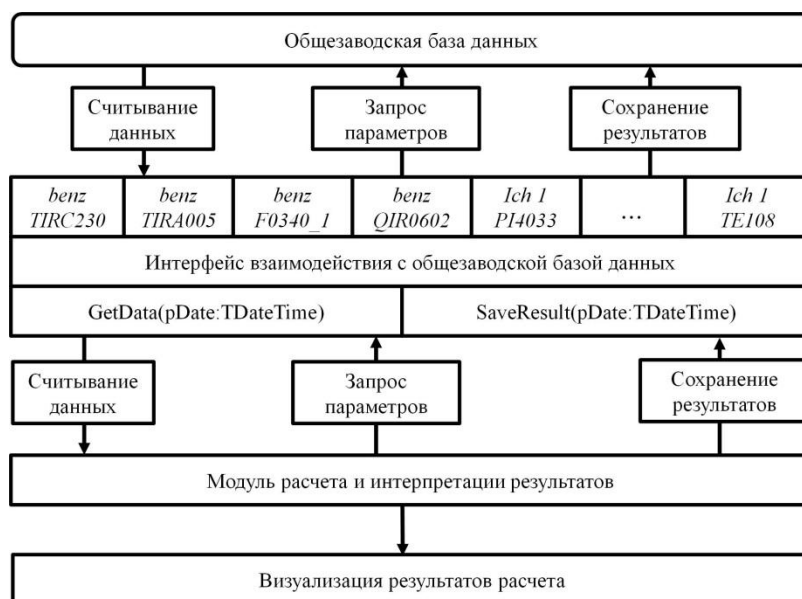


Рис. 2. Схема внутренней архитектуры ЕТВД

К настоящему времени на установке проведено 8 регенераций, переработано более 9 млн т сырья. Катализатор отработал 12 лет, в то время как теоретический срок службы его составляет 7 лет. При этом проведение промышленного мониторинга работы установки ЛЧ-35-11/1000 в течение длительного времени позволило существенно продлить срок службы катализатора, который в настоящее время в полтора раза превысил расчетный.

Выполненный мониторинг показал, что изменение активности катализатора в разных сырьевых циклах даже в пределах одной и той же установки имеет различный характер. Четко прослеживается тенденция стабилизации режима и уменьшения степени отклонения уровня текущей активности от уровня оптимальной активности от одного сырьевого цикла к другому.

На рис. 3 и 4 приведены зависимости коксоотложения и значения текущей активности в зависимости от объема переработанного сырья в разных эксплуатационных периодах работы установки ЛЧ-35-11/1000, которые определяются активностью и стабильностью катализатора, углеводородным составом сырья и катализата, режимными условиями, а также суммарным объемом переработанного сырья.

Зависимость активности катализатора – трендовая, а зависимость коксонакопления – нелинейная в зависимости от объема переработанного сырья.

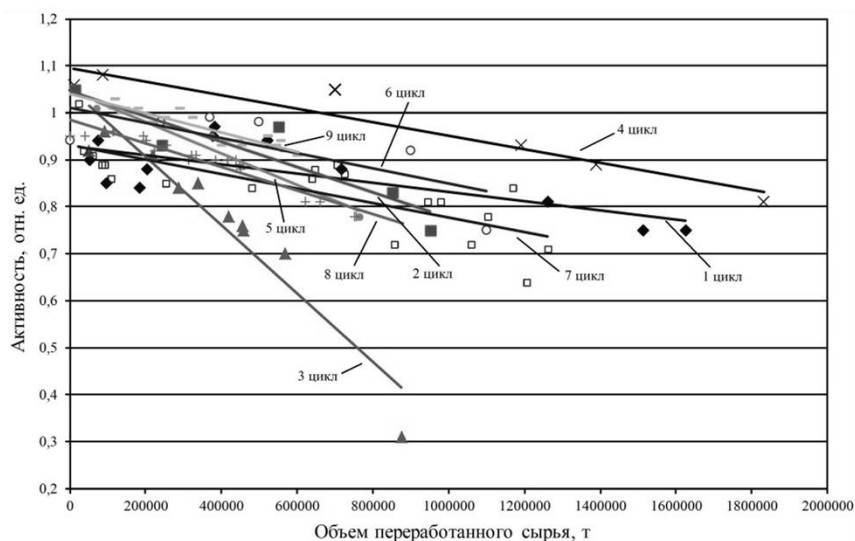


Рис. 3. Зависимость текущей активности катализатора от объема переработанного сырья для разных сырьевых циклов

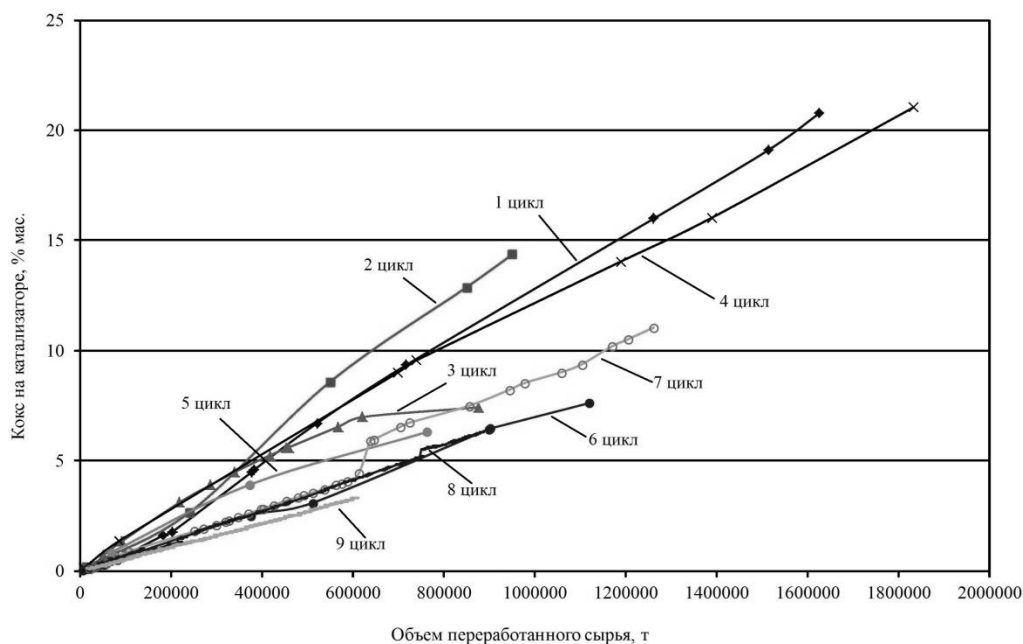


Рис. 4. Зависимость коксонакопления от объема переработанного сырья

В целом, опыт промышленного применения КМС «Система контроля работы катализатора» показал:

- Увеличение стабильности работы Pt-Re катализаторов риформинга от одного межрегенерационного цикла к другому. Так, например, активность катализатора за седьмой и восьмой сырьевой цикл в среднем снизилась на 0,25 отн. ед., а в последнем, девятом, и вовсе на 0,1 отн. ед., что уменьшает затраты на его регенерацию, или увеличивает межрегенерационный период его работы до двух лет;
- Увеличение селективности работы катализаторов марок RG-492, 582, что подтверждается уменьшением коксонакопления между циклами. Согласно приведенной на рис. 4 графической зависимости, количество кокса на катализаторе на конец первого и четвертого сырьевого цикла составляет 21 и 22,5 % соответственно, а в восьмом и девятом – 6,11 и 3,27 %.
- Увеличение производительности установки по количеству переработанного сырья в год, а также длительности эксплуатационного периода ее работы. Так в шестом цикле было про-

изведено свыше нормы 115 тыс. т, а в седьмом – 135 тыс. т. Также стоит отметить, что первый и четвертый межрегенерационный цикл длились около двух лет.

- Получение без дополнительных капитальных затрат дополнительной прибыли от реализации целевого продукта – товарного бензина.

При этом стоит отметить, что определяющим фактором, влияющим на текущий режим работы установки в каждом сырьевом цикле, является состав поступающего на переработку углеводородного сырья, а также различного рода нестандартные технологические ситуации. К таким нестандартным условиям относится проскок серы или тяжелых металлов, в результате чего происходит попадание части нестабильного гидрогенизата в сырьевой поток реактора каталитического риформинга бензинов, а также, например, неисправность теплообменного оборудования блока стабилизации гидрогенизата.

Прогнозирование каталитической активности реакторного блока риформинга и режимов работы катализатора также является очень важной задачей. Процесс прогнозирования осложняется, прежде всего, нестационарностью процесса каталитического риформинга – изменение состава сырья, загрузки установки сырьем и т. д. Причем влияние внешних возмущающих параметров часто невозможно спрогнозировать вообще – аварийные ситуации, спрос на продукцию, перебои поставок сырья и т. д. Для оценки потенциала работающего катализатора проведено прогнозирование его работы [8, 9].

Параметры прогнозирования приведены в таблице, прогноз проводился в период с 12.07.2011 г. по 01.01.2012 г., т. е. до того момента как прошел один год после регенерации катализатора.

Таблица. Параметры прогнозирования работы установки ЛЧ-35-11/1000

Параметры прогнозирования	
Начальная температура ввода сырья, °С	491
Расход сырья, м ³ /час	157
Октановое число, О.Ч.И.	96
н-П/и-П сырье	1,14
П/(На + Ар)	1,29
Перепад температур, °С	63,8
Кратн. цирк. м ³ /м ³	1262
Водород в ВСГ, %	86,7

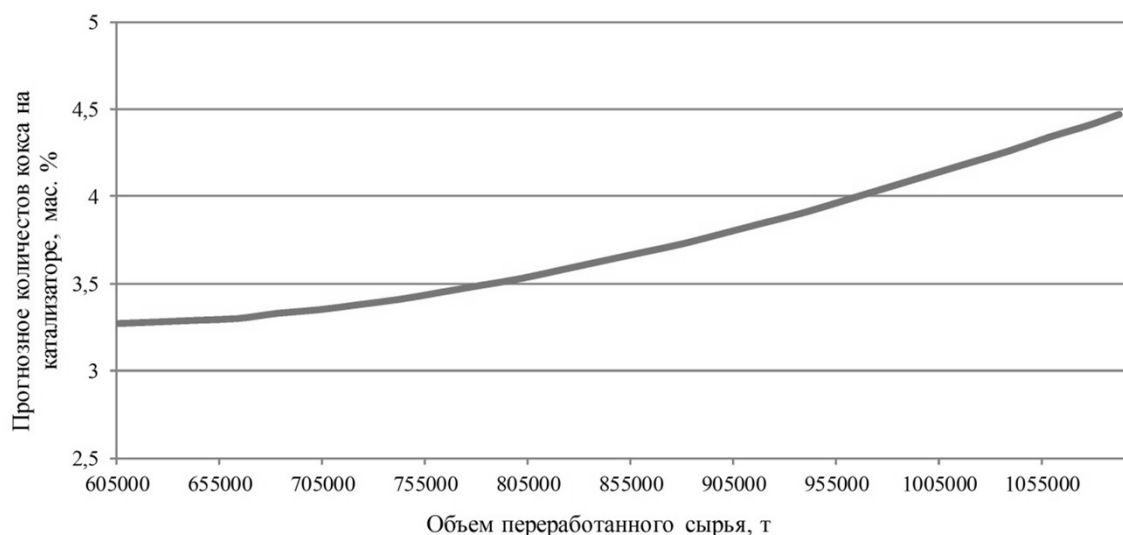


Рис. 5. Прогнозирование отложений кокса на поверхности катализатора

Прогнозирование активности катализатора является значимым, потому что это способствует оптимальному ведению процесса с получением максимального выхода продуктов ри-

форминга. В свою очередь это позволяет обеспечить ресурсоэффективность процесса, улучшить технико-экономические показатели работы как установки, так и производства в целом.

Из рис. 5 видно, что согласно прогнозу количество кокса на катализаторе к 01.01.2012 составит 4,47 %. Проведенный прогноз работы установки в новом сырьевом цикле показал, что при сохранении стационарного режима ее работы, катализатор обладает высоким потенциалом – 0,84 отн. ед. и прогнозные температуры ввода сырья позволяют продолжать сырьевой цикл без регенерации катализатора и в начале 2012 г.

Применение моделирующих компьютерных систем в химической технологии в настоящее время относится к прогрессивным направлениям развития химической промышленности. Компьютерные моделирующие системы, включающие в себя математические модели на основе физико-химической сущности процесса, являются на сегодняшний день наилучшей альтернативой моделям, описанным по принципу «черного ящика». Кроме того такие модели обладают прогнозирующей способностью, что также является их неоспоримым преимуществом.

Таким образом, метод математического моделирования позволяет решить проблему повышения ресурсоэффективности процессов нефтепереработки. Становится возможным прогноз длительности цикла работы промышленного реактора при условии учета реакционной способности углеводородов и активности катализатора. Поддержание активности катализатора в оптимальном режиме обеспечивает повышение селективности процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Молотов К.В., Коронатов Н.Н., Иванчина Э.Д., Кравцов А.В., Чеканцев Н.В., Шарова Е.С., Гынгазова М.С. Ресурсоэффективность применения моделирующих систем на физико-химической основе в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2011. – № 2. – С. 3–6.
2. Костенко А.В., Молотов К.В., Кравцов А.В., Иванчина Э.Д., Ясюкевич О.М. Мониторинг установки ЛЧ-35-11/1000 с использованием компьютерной системы контроля работы катализаторов риформинга // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2007. – № 4. – С. 13–16.
3. Кравцов А.В., Иванчина Э.Д. Компьютерное прогнозирование и оптимизация производства бензинов. Физико-химические и технологические основы. – Томск: STT, 2000. – 192 с.
4. Бабицкий С.Л., Смолин А.В., Рослик В.В. и др. Опыт промышленного применения моделирующего стенда каталитического риформинга бензинов // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2004. – № 11. – С. 37–44.
5. Кравцов А.В., Иванчина Э.Д. Компьютерное прогнозирование оптимальной эксплуатации промышленных установок риформинга. – Томск: Изд-во СО РАН, 1992. – 65 с.
6. Долганов И.М., Францина Е.В., Афанасьева Ю.И., Иванчина Э.Д., Кравцов А.В. Моделирование промышленных нефтехимических процессов с использованием объектно-ориентированного языка Delphi // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 5. – С. 57–61.
7. Кравцов А.В., Иванчина Э.Д., Галушин С.А., Полубоярцев Д.С. Системный анализ и повышение эффективности нефтеперерабатывающих производств методом математического моделирования. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 170 с.
8. Костенко А.В., Молотов К.В., Иванчина Э.Д., Кравцов А.В., Фалеев С.А., Абрамин А.Л. Разработка и применение технологических критериев оценки активности и стабильности Pt-катализаторов риформинга бензинов методом математического моделирования // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2007. – № 6. – С. 18–22.
9. Кравцов А.В., Иванчина Э.Д., Молотов К.В., Фалеев С.А., Шарова Е.С. Повышение эффективности реакционных процессов нефтепереработки методом математического моделирования // Труды IX Петербургского Междунар. Форума ТЭК. – Санкт-Петербург, 25–27 марта 2009. – СПб.: Химиздат, 2009. – С. 198–201.

Поступила 15.11.2011 г.