

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ КАТАЛИЗАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ МОДЕЛИ

У.Ю. Осипенко, Л.А. Русинов (СПбГТИ (ТУ))

Описаны особенности каталитического процесса производства олефинов из нормальных парафинов. Приведены этапы разработки диагностической модели для оценки падения активности катализатора на базе нечеткой логики. Показано использование нечеткой кластеризации для формирования функций принадлежности в условной части нечетких правил диагностической модели.

Ключевые слова: диагностическая модель, нечеткая логика, кластеризация, продукционные правила, процесс производства олефинов.

Введение

Производство олефинов из нормальных парафинов является технологически сложным процессом. Он разделен на блоки, различающиеся своим назначением [1–5]. Непосредственно каталитическому превращению сырья в целевой продукт предшествует разделение исходной широкой фракции на более узкие для выделения требуемых *n*-парафинов — C_{10} - C_{13} . Основной реакцией следующего блока (Пакол) является реакция дегидрогенизации *n*-парафинов до соответствующих им нормальных моноолефинов, которые являются целевым продуктом. Последний блок производства предназначен для селективного превращения диолефинов — побочных продуктов блока Пакол — в моноолефины.

Целевой продукт процесса используется для алкилирования с получением линейного алкилбензола (ЛАБ) при взаимодействии олефинов с бензолом [1–4]. ЛАБ далее подвергают сульфированию для производства биоразлагаемого моющего средства, экологическая безопасность которого для окружающей среды способствует его масштабному использованию.

О работе блока Пакол судят по селективности к моноолефинам, превращению парафинов в олефины и по сроку службы катализатора [1]. Дегидрирование парафинов в олефины — обратимая эндотермическая реакция, поэтому превращение линейных парафинов до олефинов увеличивается с увеличением температуры. Однако повышение температуры ведет к снижению селективности, то есть уменьшению соотношения массы образованных олефинов к количеству превращенных *n*-парафинов, и влечет за собой снижение срока службы катализатора [1].

Превращение до моноолефинов идет при определенном соотношении числа молей водорода к числу молей углеводородов сырья. С уменьшением данного соотношения при постоянных значениях давления и температуры понижается парциальное давление водорода, что, с одной стороны, ведет к увеличению конверсии сырья, с другой — к увеличению образования кокса на катализаторе, и следовательно, к сокращению его срока службы [1].

Для стабилизации активности катализатора в газосырьевую смесь до входа в реактор добавляется деионизированная вода [1, 4]. Недостаточная влажность уменьшает выход моноолефинов и способствует образованию кокса.

Кроме того, в реакторе Пакол протекает ряд побочных реакций, включая образование ароматических углеводородов и кокса [1–5]. Они снижают селективность процесса по моноолефинам, приводят к образованию побочных продуктов, отрицательно влияющих в дальнейшем на биоразлагаемость ЛАБ, и снижают срок службы катализатора.

С течением времени работы катализатора даже при выборе оптимальных значений технологических параметров процесса (температура, давление, объемная скорость подачи сырья, соотношение молей водорода и углеводородов сырья, влажность, качество сырья) происходит снижение его активности, что приводит к уменьшению выработки моноолефинов. Для поддержания выхода целевого продукта на одном уровне, операторы увеличивают температуру на входе в реактор. Сбережение ресурса работы катализатора возможно путем регулирования расходов воды и водородсодержащего газа в реактор.

В таких условиях требуется своевременно оповещать оператора установки не только о необходимости подъема температуры, но и о новом значении технологического параметра. К сожалению, оперативно определить это по концентрации моноолефинов после реактора невозможно из-за нерегулярности проводимых на установке лабораторных анализов. Поэтому важной задачей является разработка диагностической системы, которая, осуществляя мониторинг определяющих технологических параметров процесса, позволит обеспечить персонал блока всей необходимой информацией о степени активности катализатора и необходимости изменения значения технологических параметров.

Процесс дегидрирования *n*-парафинов как объект исследования

Основной реакцией процесса Пакол является реакция дегидрогенизации *n*-парафинов до *n*-моноолефинов, которые являются целевым продуктом. Однако помимо целевой реакции на катализаторе протекают побочные, в том числе реакции крекинга с образованием более легких углеводородов.

Температура — главный переменный параметр, используемый для управления и регулирования конверсии в реакторе Пакол и достижения необходимого количества образующихся олефинов. Дегидрирование парафинов в олефины — обратимая эндотерми-

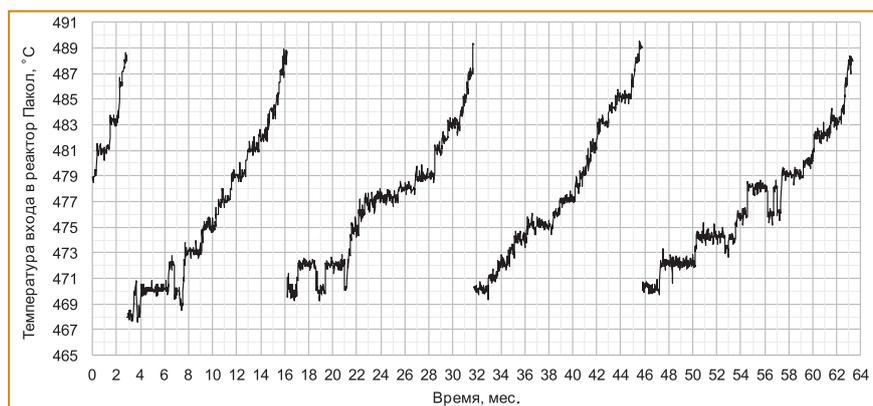


Рис. 1. Последовательные жизненные циклы катализатора реактора Пакол

ческая реакция, поэтому степень превращения увеличивается с подъемом температуры. Отрицательный эффект при повышении температуры состоит в снижении селективности по моноолефинам и образовании кокса, что влечет за собой снижение срока службы катализатора [1].

Понизить интенсивность образования на поверхности катализатора кокса и частично деструктурировать его возможно подачей в реактор деминерализованной воды.

Для компенсации снижения выработки олефинов во времени, вызванного падением активности катализатора, на установке увеличивают температуру на входе в реактор. На рис. 1 приведены графики изменения температуры во времени, показывающие последовательные жизненные циклы катализатора за последние пять лет.

Учитывая нерегулярность проводимых лабораторных анализов, определяющих концентрацию моноолефинов после реактора, для оперативного отслеживания состояния катализатора необходимо определить перечень технологических параметров, косвенно указывающих на снижение его активности. Для этого был выполнен анализ данных промыш-

ленной установки производства олефинов, а также использована математическая модель реактора, описанная в работе [6].

Анализ данных показал, что при постоянных значениях других технологических параметров перепад температуры на реакторе уменьшается с течением времени. При увеличении температуры — перепад увеличивается, а затем с течением времени снова снижается (рис. 2). На перепад температуры на реакторе влияет также давление на входе в реактор, а также период жизненного цикла катализатора: чем

ближе к концу цикла, тем быстрее снижается перепад температуры во времени.

Модель реактора Пакол [6] построена на уравнениях кинетики по следующей схеме превращений: Парафины → Моноолефины → Диолефины → Ароматика. В ней также учитывается снижение во времени полезного объема катализатора, связанное с крекингом углеводородов.

По модели были получены данные об изменении значений технологических параметров процесса в течение жизненного цикла катализатора без подъема температуры на входе в реактор для компенсации падения активности катализатора. Результат обработки данных подтвердил, что косвенно о содержании моноолефинов на выходе из реактора можно судить по перепаду температуры на реакторе.

В результате анализа были выбраны следующие технологические параметры для оценки состояния катализатора: температура на входе в реактор, перепад температуры по реактору, перепад давления по реактору, давление на входе в реактор.

Разработка нечеткой диагностической модели

Во многих задачах принятия решений приходится иметь дело с большим объемом разнородной информации как количественной, так и качественной. Реальные технологические процессы всегда работают в условиях неполной информации, зачастую это связано с недостаточной изученностью механизмов протекания процесса. Для диагностических систем, связанных с обработкой нечеткой информации, наиболее перспективным оказался аппарат нечеткой логики, оперирующий теорией нечетких множеств.

В нечетком множестве A каждый его элемент $u_i \in U$ (U — универсальное множество, содержащее все возможные элементы u_i) имеет кроме своего значения еще один атрибут: степень принадлежности его к этому множеству, определяемую значением функции принадлежности $\in A_i$ [7].

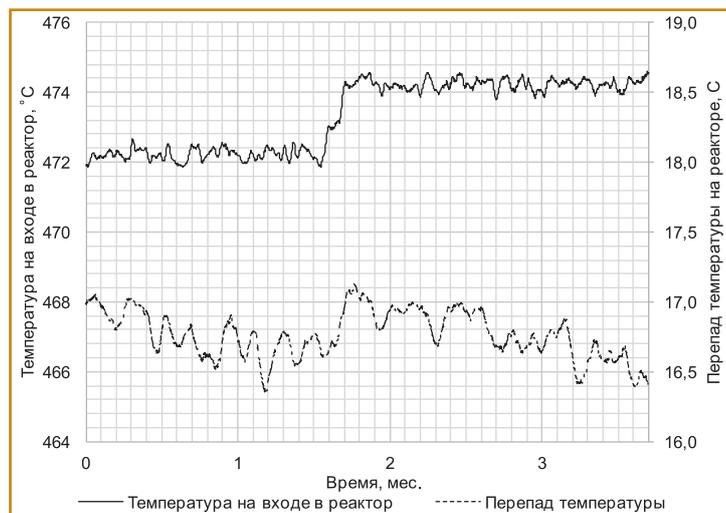


Рис. 2. Влияние повышения температуры на входе в реактор на перепад температуры на реакторе

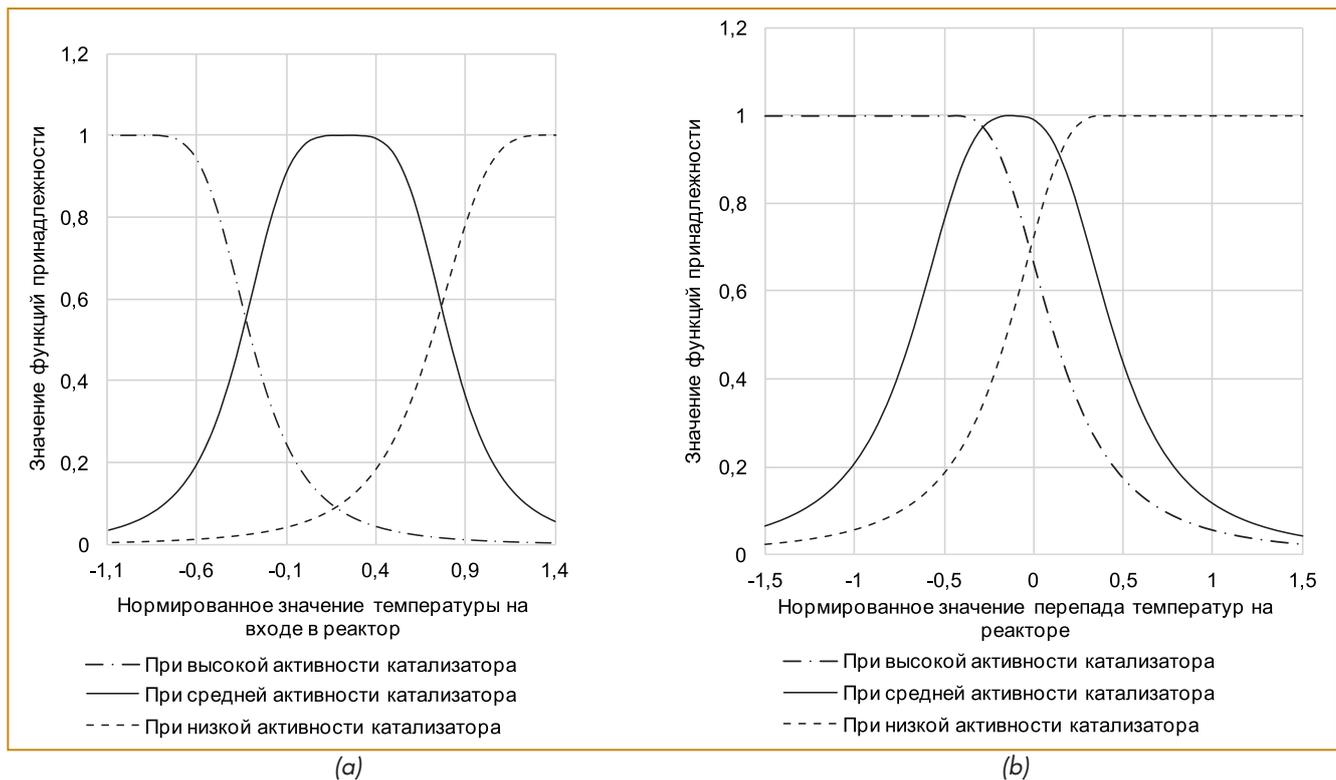


Рис. 3. Функции принадлежности, полученные при кластеризации для параметров: температура входа в реактор (a) и перепад температур на реакторе (b) при «высокой», «средней» и «низкой» активности катализатора

Один из возможных подходов к on-line диагностике состояния процесса является разработка нечеткой модели, включающей описание каждого определенного состояния в виде нечетких правил [7–10], которые имеют вид:

$$R_i: \text{ЕСЛИ } x_{i1} == A_{i1} \text{ И } \dots \text{ И } x_{in} == A_{in}, \text{ ТО } y_i,$$

где R_i — i -ое правило нечеткой модели, $i \in [1, k]$ k — число правил;

$x_i = \{x_{ij}\}$ — матрица входных переменных каждого i -го правила, $j \in [1, n]$ n — число входов;

$A_i = \{A_{ij}\}$ — совокупность нечетких терм-множеств, входящих в условную часть каждого i -го правила;

y_i — выход i -го нечеткого правила.

Результат определяется с помощью расчета степени активации каждого правила по функциям принадлежности входов:

$$\beta_i = \prod_{j=1}^n \mu_{A_{ij}}(x_{ij}),$$

где $\mu_{A_{ij}}(x_{ij}) \in [0, 1]$ — вклад каждого нечеткого множества A_{ij} в условную часть правила R_i .

Нечеткое множество и его функция принадлежности могут использоваться для представления переменных, заданных в вербальной форме — лингвистических переменных [8]. Множество значений лингвистической переменной образует терм-множество. Например, терминами множества лингвистической переменной «температура» могут быть: «высокая», «средняя», «низкая». Использование в производственных правилах лингвистических

переменных позволяет эффективно формализовать нечеткую экспертную информацию.

Каждое нечеткое производственное правило может использовать несколько предпосылок в условной части и несколько заключений. Число правил в модели определяется количеством различных состояний процесса. Для выделения из всех возможных состояний некоторого числа однородных групп удобно использовать кластеризацию [7, 9].

Кластеризация — это объединение объектов в группы (кластеры) на основе схожести признаков для объектов одной группы и отличий между группами. Исходной информацией для кластеризации является матрица наблюдений X , каждая строка которой представляет собой значения n признаков одного из m объектов кластеризации [7]. Каждый кластер представляет некоторую операционную область системы, и число кластеров c , найденных в данных, равняется числу нечетких правил. Обычно это число определяется в процессе кластеризации.

Для кластеризации был выбран алгоритм Густавсона-Кесселя [9, 10], поскольку он использует адаптивную норму для каждого кластера. В этом алгоритме при кластеризации оптимизируются не только координаты центров кластеров и матрица нечеткого разбиения, но также и норм-порождающие матрицы для всех кластеров [7, 8, 9]. Это позволяет выделять кластера различной геометрической формы.

Кластеризация нескольких массивов данных, характеризующих различные жизненные циклы катализатора показала, что каждый период работы ка-

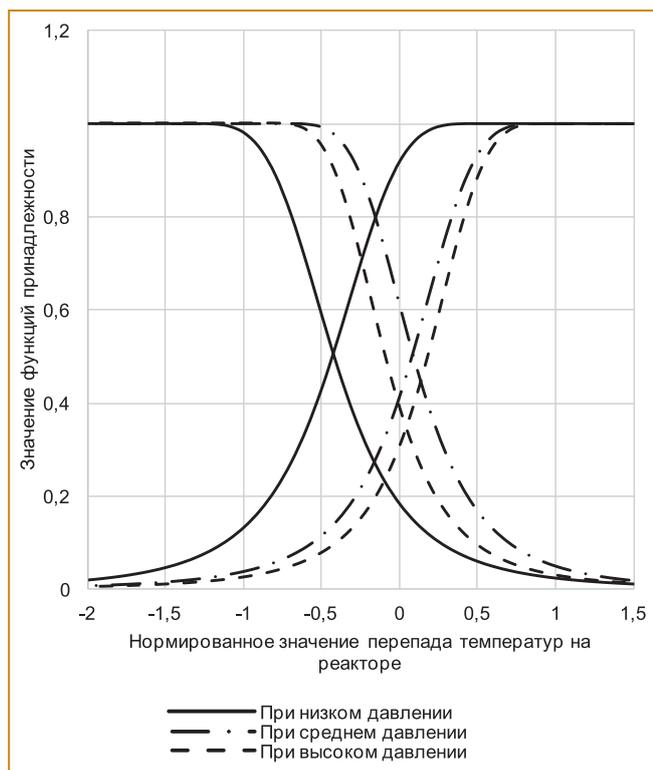


Рис. 4. Функции принадлежности для параметра перепад температуры на реакторе, определяющие его «низкое» и «нормальное» значение при различных значениях давления в реакторе

тализатора можно разбить на три области (высокая активность, средняя активность, низкая активность катализатора), поведение технологических параметров внутри которых более подобно друг другу по сравнению с их поведением в других кластерах.

Функции принадлежности нечетких множеств в условной части правил получаются из нечеткой матрицы разделения U , каждый элемент которого характеризует степень принадлежности отдельных наблюдений кластерам. Для получения одномерного нечеткого множества многомерные нечеткие множества проецируются на пространство входных переменных X [10].

Входными переменными для определения степени активности катализатора были приняты: x_{i1} — температура на входе в реактор, x_{i2} — перепад температуры на реакторе. Значения входных переменных были взяты из архива SCADA-системы с двухчасовым интервалом за период полного жизненного цикла катализатора (около 16 мес.).

Полученные в результате кластеризации нечеткие множества были аппроксимированы колоколообразной формой функции при-

надлежности. На рис. 3 приведены функции принадлежности для входных переменных.

На следующем шаге с помощью нечеткой кластеризации были получены функции принадлежности для технологического параметра перепад температуры на реакторе (x_{i3}), устанавливающие принадлежность параметра к терму «Низкий», при различных значениях давления на входе в реактор (x_{i4}) (рис. 4).

Производственные правила, идентифицирующие низкое значение перепада температуры на реакторе, характеризующее снижение образования нормальных олефинов, имеют следующий вид:

R_1 : Если $x_{i1} = A_{11}$ И $x_{i2} = A_{12}$ И ($(x_{i3} = A^1_{13}$ И $x_{i4} = \text{«Давление низкое»}$) ИЛИ ($x_{i3} = A^2_{13}$ И $x_{i4} = \text{«Давление среднее»}$) ИЛИ ($x_{i3} = A^3_{13}$ И $x_{i4} = \text{«Давление высокое»}$), ТО C_1 ;

R_2 : Если $x_{i1} = A_{21}$ И $x_{i2} = A_{22}$ И ($(x_{i3} = A^1_{13}$ И $x_{i4} = \text{«Давление низкое»}$) ИЛИ ($x_{i3} = A^2_{13}$ И $x_{i4} = \text{«Давление среднее»}$) ИЛИ ($x_{i3} = A^3_{13}$ И $x_{i4} = \text{«Давление высокое»}$), ТО C_2 ;

R_3 : Если $x_{i1} = A_{31}$ И $x_{i2} = A_{32}$ И ($(x_{i3} = A^1_{13}$ И $x_{i4} = \text{«Давление низкое»}$) ИЛИ ($x_{i3} = A^2_{13}$ И $x_{i4} = \text{«Давление среднее»}$) ИЛИ ($x_{i3} = A^3_{13}$ И $x_{i4} = \text{«Давление высокое»}$), ТО C_3 .

В условной части правил термы A_{i1} и A_{i2} определяют принадлежность входных переменных x_{i1} и x_{i2} к температуре входа в реактор и перепаду температур на реакторе при высокой активности катализатора ($i=1$), средней ($i=2$) и низкой ($i=3$). Термы A^j_{13} определяют «низкий» перепад температур при различных значениях давления в реакторе: $j=1$ — при низком давлении, $j=2$ — при среднем давлении, $j=3$ — при высоком давлении.

Вывод формируется после определения правила, для которого степень активации оказалась максимальной. Термы в консеквенте правил соответствуют выводимым на экран оператора сообщениям:

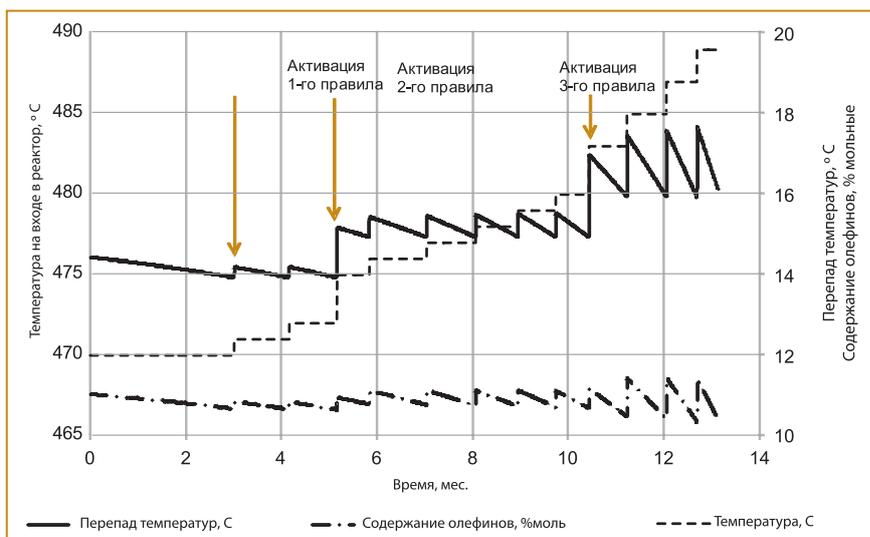


Рис. 5. Результат имитационного моделирования работы реактора с компенсацией снижения выхода олефинов при работе системы диагностики

C_1 = «Необходимо увеличить температуру на 1°C, расход воды в реактор на 0,5 л/ч»;

C_2 = «Необходимо увеличить температуру на 2°C, расход воды в реактор на 0,5 л/ч»;

C_3 = «Необходимо увеличить температуру на 2°C, расход воды в реактор на 1 л/ч».

На рис. 5 показаны результаты моделирования работы реактора по данным из работы [6], при повышении температуры в моменты, определяемые приведенными выше правилами. Стрелками указаны зоны активации правил. Из графиков видно, что процентное содержание олефинов на выходе поддерживается примерно на одном уровне в течение всего цикла работы катализатора.

Значения температуры на входе в реактор и расхода воды, подаваемой на смешение с сырьем реактора, были определены по действительным значениям данных параметров на различных периодах жизненного цикла катализатора.

Разработанная производственная модель позволит избежать субъективного фактора при принятии решения о необходимости изменения параметров, влияющих на процесс, для поддержания выхода олефинов из реактора и продления срока службы катализатора.

Заключение

Множество факторов влияет на выход олефинов и на активность катализатора реактора Пакол. Увеличение температуры повышает степень превращения *n*-парафинов, однако снижается селективность по моноолефинам из-за образования побочных продуктов и кокса. С уменьшением соотношения числа молей водорода к числу молей углеводородов сырья, с одной стороны, увеличивается конверсия, с другой — снижается срок службы катализатора из-за повышенного образования кокса. Недостаточная влажность уменьшает выход моноолефинов и увеличивает выход легких фракций. При этом также снижается действие платины катализатора, в результате чего происходит процесс крекирования и добавочного образования кокса. Увеличение влажности, в свою очередь, тоже ведет к снижению выхода олефинов, однако он будет обусловлен тем, что вода, также как и *n*-парафины, займет активные центры катализатора.

Для поддержания выхода целевого продукта на одном уровне необходимо увеличивать температуру на входе в реактор. И аккуратно корректировать подачу воды перед реактором через дозировочный насос для сбережения ресурса работы катализатора.

Осипенко Ульяна Юрьевна — старший преподаватель кафедры ресурсосберегающих технологий,
Русинов Леон Абрамович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации процессов химической промышленности Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет).
 Контактный телефон (812)494-92-79.
 E-mail: osipenko.u@gmail.com lrusinov@yandex.ru

Поступило в редакцию 20.12.2018.

После переработки 18.01.2019.

Принято к публикации 24.01.2019.

Оперативно определить необходимость корректировки значений технологических параметров для учета степени падения активности катализатора по концентрации моноолефинов после реактора невозможно из-за нерегулярности проводимых на установке лабораторных анализов.

Разработанная диагностическая модель на базе нечеткой логики, осуществляющая непрерывный мониторинг определяющих технологических параметров процесса, позволит обеспечить персонал блока информацией о степени активности катализатора; определит необходимость подъема температуры в реакторе для поддержания выхода олефинов на желаемом уровне и расхода воды в реактор для продления срока службы катализатора; выдаст количественные рекомендации по изменению значения технологических параметров.

Список литературы

1. Баннов П.Г. Процессы нефтепереработки. Ч.2. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 2001. 415 с.
2. Robert A. Meyers. Handbook of Petroleum Refining Processes. 4th Edition. New York: McGraw-Hill Education, 2016. 900 p.
3. Hydrocarbon Processing's Petrochemical Processes 2010. Gulf Publishing Company, Houston. P. 48.
4. UOP Linear Alkylbenzene (LAB) Complex// URL: <https://www.honeywell-uop.cn/wp-content/uploads/2011/02/UOP-LAB-Complex-Data-Sheet.pdf>.
5. Осипенко У.Ю., Русинов Л.А. Разработка диагностической модели для диагностики состояния процесса получения олефинов // Известия СПбГТИ(ТУ). 2018. №42. С. 87-90.
6. Гурко Н.С., Федоров В.И., Лисицын Н.В. Имитационное моделирование и оптимизация процесса дегидрирования *n*-парафинов в моноолефины // Автоматизация в промышленности. 2009. №9. С. 11-14.
7. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику // <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>.
8. Alcalá R., Alcalá-Fdez J., Casillas J., Cordon O., Herrera F. Local identification of prototypes for genetic learning of accurate tsf fuzzy rule-based system // International Journal of Intelligent Systemc. 2007. V.22. P.909-941.
9. Mendonca L.F., Sousa J.M.C., Sada Costa J.M.G. An architecture for fault detection and isolation based on fuzzy methods // Expert Systems with Applications. 2009. V.36. P.1092-1104.
10. Mendonca L.F., Vieira S.M., Sousa J.M.C. Decision tree search methods in fuzzy modeling and classification // International Journal of Approximate Reasoning. 2007. V.44. P.106-123.