

УДК 51-74

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2024.2.6

МНОГОФАКТОРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОЦЕССА КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА

© И. И. Маннанова^{1*}, В. Р. Кифятов¹, Р. З. Зайнуллин²,
И. М. Губайдуллин^{1,3}

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет
Россия, Республика Башкортостан, 450064 г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

²ООО «Ишимбайский специализированный химический завод катализаторов»
Россия, Республика Башкортостан, 453203 г. Ишимбай, ул. Левый берег, 6.

³Институт нефтехимии и катализа УФИЦ РАН
Россия, Республика Башкортостан, 450075 г. Уфа, пр. Октября, 71.

*Email: in.mannanova.in55@gmail.com

В статье авторами проведен анализ данных технологического режима работы установки каталитического риформинга за 1 год. Данные представляют собой технологические параметры, такие как температура сырья на входе в первый реактор, давление на входе в первый реактор и т.д. Произведено усреднение данных до среднесуточных. Выявлены и исключены нерезжимные параметры, периоды простоя. Осуществлен регрессионный анализ методом многофакторной линейной регрессии с целью получения математической модели установки. Применение данного метода позволяет учитывать влияние нескольких параметров одновременно. Построен фронт Парето для выявления оптимального режима работы установки.

Ключевые слова: каталитический риформинг, математическое моделирование, регрессионный анализ, многофакторная регрессия, фронт Парето.

Введение

В соответствии с Техническим регламентом Таможенного союза [1] к бензинам экологического класса К5 предъявляются жесткие требования по таким характеристикам, как содержание бензола, ароматических углеводородов, серы, кислорода. Процесс каталитического риформинга бензина позволяет получить бензин с более высоким октановым числом за счет образования ароматических углеводородов [2]. Оптимизировать процесс каталитического риформинга можно различными методами (тщательная подготовка сырья, модификация катализаторов, изменение параметров процесса), но наиболее оптимальным и малозатратным способом является создание математических и компьютерных моделей [3]. В литературе [4–7] применяются различные подходы к моделированию процесса риформинга. Применение детерминированных моделей позволяет адекватно описать процесс в широком интервале изменения его технологических параметров. Эти модели хорошо описывают закономерности реакций, происходящих в реакторе, с физической точки зрения, а также химизм процесса. При создании статистической модели каталитического риформинга используются фактические параметры процесса, что позволяет наиболее точно смоделировать процесс на конкретной установке. Также с помощью статистических моделей можно предсказать, как изменится качество продукта, если изменятся какие-либо свойства сырья или параметры процесса в режиме управления. Построение фронта Парето позволяет выбрать оптимальные условия для получения наилучших характеристик продукта.

Сущность процесса каталитического риформинга

Процесс каталитического риформинга является базовым в нефтепереработке. Основными продуктами данного процесса являются:

- риформат – высокооктановый компонент моторных топлив;
- водородсодержащий газ (ВСГ) – он содержит 80–90% об. водорода и применяется в гидрогенизационных процессах (гидроочистка, изомеризация, гидрирование и т.д.) [8]. Получаемый таким образом водород значительно дешевле получаемого специально;
- бензол, толуол, ксилолы – их получают на установках каталитического риформинга, нацеленных на производство сырья для нефтехимии.

Каталитический риформинг основывается на трех типах реакций. Реакции образования ароматических соединений являются самыми значимыми (рис. 1):

- 1) дегидрирование шестичленных циклоалканов;
- 2) дегидроизомеризация пятичленных циклоалканов;
- 3) дегидроциклизация алканов.

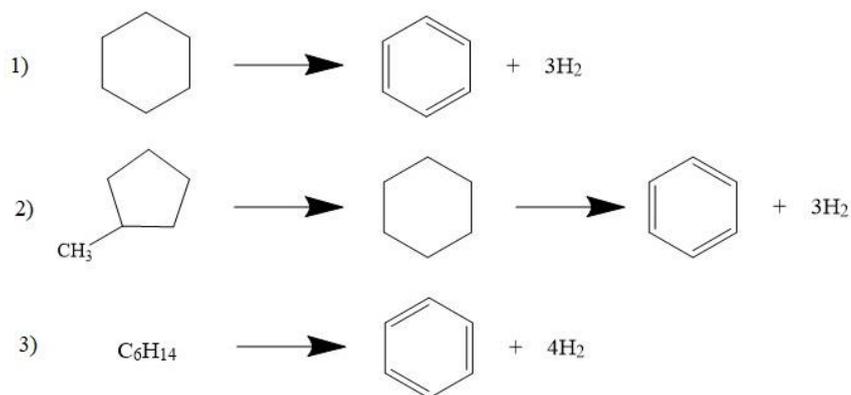


Рис. 1. Схемы реакций с образованием ароматических углеводородов.

Гидрокрекинг парафинов является нежелательной реакцией в процессе. Продуктами этой реакции являются газы, из-за чего происходит снижение селективности процесса (рис. 2).



Рис. 2. Реакция гидрокрекинга парафина.

Еще один тип нежелательных реакций – реакции уплотнения, результатом которых является образование кокса на поверхности катализатора, что приводит к снижению его активности.

Для получения ароматических углеводородов важна реакция деалкилирования алкилбензолов, потому что в результате происходит увеличение выхода низкомолекулярных гомологов бензола (рис. 3).



Рис. 3. Реакция деалкилирования алкилбензола.

Получаемые в результате каталитического риформинга продукты используют следующим образом. Жидкие продукты (рифформат) используют как высокооктановый компонент моторных топлив или направляют на получение ароматики. Получаемым водородом частично пополняют потери циркулирующего ВСГ и осуществляют гидроочистку исходного сырья (если она проводится) [9]. Большую часть водорода выводят с установки и используют для других процессов (например, для гидроочистки нефтяных дистиллятов [10]). Также в результате разделения газов каталитического риформинга получают сухой (C_1 – C_2 или C_1 – C_3) и сжиженные газы (C_3 – C_4). В результате получают стабильный дебутанизованный бензин.

Рассмотрим влияние основных технологических параметров на результаты каталитического риформинга.

Низкое давление (парциальное давление водорода) благоприятно сказывается на увеличении степени ароматизации парафинов и нафтенов. Но процесс осуществляется при высоком давлении, т.к. в этом случае значительно снижается закоксовывание катализатора и уменьшается его чувствительность к отравлению сернистыми и другими ядами. Также происходит увеличение скорости реакций гидрокрекинга и деалкилирования.

Увеличение температуры положительно сказывается на образовании ароматических углеводородов и на повышении октанового числа [3], а также тормозит протекание обратной реакции и превращение некоторых изомеров нафтенов в парафины, которые легче подвергаются гидрокрекингу [5]. Также с повышением температуры происходит уменьшение выхода стабильного бензина, снижается содержание водорода в циркулирующем ВСГ и увеличивается выход пропана, н-бутана и изобутана. Это обусловлено увеличением роли гидрокрекинга при высоких температурах.

В практике процесс каталитического риформинга осуществляется на платиносодержащих катализаторах в среде ВСГ (70–90% об. водорода) при температуре 470–530 °С, давлении 10–40 ат, объемной скорости 1–3 ч⁻¹ и при соотношении циркулирующий ВСГ:сырье = 600–1 800 м³/м³.

Вычислительные эксперименты с промышленными данными Зависимость октанового числа бензина от основных параметров процесса

В качестве исходных данных используются промышленные данные с установки каталитического риформинга за 1 год. Сбор и накопление технологических параметров осуществляется ежеминутно. Наблюдаются периоды простоя, вариативность сырья и других режимных параметров. Подготовка исходных данных включает:

- исключение нережимных параметров;
- исключение периодов простоя;
- усреднение данных до среднесуточных;
- выделение периодов стабильной загрузки установки по сырью.

Выделение периодов стабильной загрузки установки по сырью осуществлялось для исключения влияния загрузки по сырью на октановое число, полученное исследовательским методом (ОЧИМ). Оно производилось следующим образом. В подготовленных данных определялись минимальное и максимальное значения расхода сырья на установку, находилась разница между этими значениями, затем к минимальному значению прибавлялся % от разницы (10%, 20% и т.д.). Шаг между выборками 10%. Было принято отклонение от полученного значения $\pm 5\%$. В результате выделения периодов стабильной загрузки установки по сырью были отобраны 3 выборки со следующими диапазонами:

- 1 выборка – 86.91–90.42 м³/ч;
- 2 выборка – 91.52–95.34 м³/ч;
- 3 выборка – 100.78–103.09 м³/ч.

Обработанные данные для выборки 1 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Обработанные данные для выборки 1

Расход сырья на установку, м ³ /ч	Температура на входе в первый реактор, °С	Температура на входе во второй реактор, °С	Температура на входе в третий реактор, °С	Среднее значение давления в системе, МПа	Кратность циркуляции ВСГ, нм ³ /м ³	ОЧИМ
86.91	480.28	479.87	453.80	2.61	965.16	94.4
87.08	482.92	482.50	466.16	2.90	1173.35	94.3
87.32	488.26	488.25	469.68	2.81	1004.62	94.7
87.49	488.99	488.92	470.84	2.40	1039.99	93.9
87.50	488.74	488.62	473.89	2.95	1181.12	95.0
87.87	484.71	484.71	466.31	2.85	1085.40	94.3
88.85	481.09	481.14	464.66	2.92	1170.46	93.7
89.41	480.93	481.06	454.80	2.64	934.63	94.5
89.45	489.35	489.06	474.36	2.98	1168.08	95.0
89.51	481.28	481.26	465.16	2.93	1158.90	93.4
89.59	480.68	480.69	455.51	2.68	980.14	95.1
89.65	481.34	480.23	463.96	2.92	1144.55	93.2
89.68	480.91	480.61	464.32	3.01	1104.82	93.1
89.85	480.92	480.52	464.39	3.00	1111.80	93.6
89.88	489.01	489.13	474.46	2.98	1160.44	95.2
89.94	482.31	482.05	463.52	2.90	1103.78	93.6
89.94	489.03	489.09	473.65	2.97	1145.37	94.5
90.04	481.04	480.73	464.60	3.02	1101.05	93.5
90.11	482.01	481.65	462.82	2.94	1016.93	94.9
90.15	481.19	480.50	463.92	2.96	1094.35	93.3
90.27	489.16	489.06	472.28	2.96	1122.05	94.9
90.36	489.06	489.08	473.21	2.97	1139.42	94.6
90.42	480.08	480.00	458.29	2.77	1126.71	94.9

Основные параметры, которые рассматриваются в качестве исходных данных, это:

- 1) температура на входе в каждый из трех реакторов;
- 2) среднее значение давления в системе;
- 3) расход сырья на установку;
- 4) кратность циркуляции ВСГ.

Данные параметры были выбраны с учетом физико-химических процессов, влияющих на качество продуктов.

С целью получения математической модели, адекватно описывающей работу установки, была проведена многофакторная линейная регрессия с 2–6 факторами. Проанализировав коэффициент детерминации, было выбрано уравнение с 6 факторами, которое наилучшим образом описывает исходные экспериментальные данные. Также проводился расчет критериев, с помощью которых выбирается наилучшее уравнение.

Уравнение регрессии с шестью факторами выглядит следующим образом:

$$y_i = a_0 + a_1x_{1i} + a_2x_{2i} + a_3x_{3i} + a_4x_{4i} + a_5x_{5i} + a_6x_{6i}, \quad (1)$$

где y_i – исходное значение ОЧИМ;

x_{1i} – температура на входе в первый реактор;

x_{2i} – температура на входе во второй реактор;

x_{3i} – температура на входе в третий реактор;

x_{4i} – среднее значение давления в системе;

x_{5i} – кратность циркуляции ВСГ;

x_{6i} – расход сырья на установку;

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ – коэффициенты регрессии.

Коэффициенты уравнения находим методом наименьших квадратов – как решение системы (2):

$$\left\{ \begin{array}{l} Na_0 + a_1 \sum x_{1i} + a_2 \sum x_{2i} + a_3 \sum x_{3i} + a_4 \sum x_{4i} + a_5 \sum x_{5i} + a_6 \sum x_{6i} = \sum y_i \\ a_0 \sum x_{1i} + a_1 \sum x_{1i}^2 + a_2 \sum x_{2i}x_{1i} + a_3 \sum x_{3i}x_{1i} + a_4 \sum x_{4i}x_{1i} + a_5 \sum x_{5i}x_{1i} + a_6 \sum x_{6i}x_{1i} = \\ = \sum y_i x_{1i} \\ a_0 \sum x_{2i} + a_1 \sum x_{1i}x_{2i} + a_2 \sum x_{2i}^2 + a_3 \sum x_{3i}x_{2i} + a_4 \sum x_{4i}x_{2i} + a_5 \sum x_{5i}x_{2i} + a_6 \sum x_{6i}x_{2i} = \\ = \sum y_i x_{2i} \\ a_0 \sum x_{3i} + a_1 \sum x_{1i}x_{3i} + a_2 \sum x_{2i}x_{3i} + a_3 \sum x_{3i}^2 + a_4 \sum x_{4i}x_{3i} + a_5 \sum x_{5i}x_{3i} + a_6 \sum x_{6i}x_{3i} = \\ = \sum y_i x_{3i} \\ a_0 \sum x_{4i} + a_1 \sum x_{1i}x_{4i} + a_2 \sum x_{2i}x_{4i} + a_3 \sum x_{3i}x_{4i} + a_4 \sum x_{4i}^2 + a_5 \sum x_{5i}x_{4i} + a_6 \sum x_{6i}x_{4i} = \\ = \sum y_i x_{4i} \\ a_0 \sum x_{5i} + a_1 \sum x_{1i}x_{5i} + a_2 \sum x_{2i}x_{5i} + a_3 \sum x_{3i}x_{5i} + a_4 \sum x_{4i}x_{5i} + a_5 \sum x_{5i}^2 + a_6 \sum x_{6i}x_{5i} = \\ = \sum y_i x_{5i} \\ a_0 \sum x_{6i} + a_1 \sum x_{1i}x_{6i} + a_2 \sum x_{2i}x_{6i} + a_3 \sum x_{3i}x_{6i} + a_4 \sum x_{4i}x_{6i} + a_5 \sum x_{5i}x_{6i} + a_6 \sum x_{6i}^2 = \\ = \sum y_i x_{6i} \end{array} \right. \quad (2)$$

В результате расчетов получаем систему для выборки 1:

$$\left\{ \begin{array}{l} 23a_0 + 11133.30a_1 + 11128.73a_2 + 10714.58a_3 + 66.06a_4 + 25233.14a_5 + 2051.26a_6 = \\ = 2167.49 \\ 11133.30a_0 + 5389460.62a_1 + 5387256.12a_2 + 5186920.59a_3 + 31975.23a_4 + \\ + 12216004.88a_5 + 992913.34a_6 = 1049217.40 \\ 11128.73a_0 + 5387256.12a_1 + 5385054.37a_2 + 5184797.86a_3 + 31961.90a_4 + \\ + 12210939.90a_5 + 992505.16a_6 = 1048788.67 \\ 10714.58a_0 + 5186920.59a_1 + 5184797.86a_2 + 4992267.64a_3 + 30780.97a_4 + \\ + 11761285.05a_5 + 955584.55a_6 = 1009747.01 \\ 66.06a_0 + 31975.23a_1 + 31961.90a_2 + 30780.97a_3 + 190.24a_4 + \\ + 72635.03a_5 + 5893.11a_6 = 6224.55 \\ 25233.14a_0 + 12216004.88a_1 + 12210939.90a_2 + 11761285.05a_3 + 72635.03a_4 + \\ + 27798300.33a_5 + 2250800.80a_6 = 2377779.62 \\ 2051.26a_0 + 992913.34a_1 + 992505.16a_2 + 955584.55a_3 + 5893.11a_4 + \\ + 2250800.80a_5 + 182972.86a_6 = 193306.92 \end{array} \right. \quad (3)$$

В итоге получаем уравнение:

$$y_i = -6.079 + 0.005x_{1i} + 0.454x_{2i} - 0.280x_{3i} + 2.314x_{4i} + 0.004x_{5i} - 0.026x_{6i}. \quad (4)$$

Для оценки погрешности в регрессионном анализе используется понятие дисперсии адекватности σ^2 по уравнению (5):

$$\sigma^2 = R/(N - m - 1) = \sum(y_i - y_{\text{расч}})^2/(N - m - 1), \quad (5)$$

где $y_{\text{расч}}$ – полученное по уравнению значение ОЧИМ;

N – количество опытов;

m – количество факторов.

$$\sigma^2 = \sum((94.4 - 94.7)^2 + \dots + (94.9 - 94.5)^2)/(23 - 6 - 1) = 0.2. \quad (6)$$

Чем меньше полученное значение дисперсии адекватности, тем меньше разница между исходным ОЧИМ и полученным по уравнению.

Для оценки качества подбора уравнения регрессии определим коэффициент детерминации R^2 по уравнению (7):

$$R^2 = 1 - (\sum(y_i - y_{\text{расч}})^2 / \sum(y_i - \bar{y})^2), \quad (7)$$

где \bar{y} – среднее значение исходного ОЧИМ.

$$R^2 = 1 - (\sum((94.4 - 94.7)^2 + \dots + (94.9 - 94.5)^2) / \sum((94.4 - 94.2)^2 + \dots + (94.9 - 94.2)^2)) = 0,7. \quad (8)$$

Значение R^2 , больше 0,5, говорит о том, что уравнение приемлемо описывает процесс (табл. 2).

Таблица 2

Значения коэффициента детерминации	
Значение	Качество
0.8–1	Уравнение хорошего качества
0.5–0.8	Уравнение приемлемого качества
0–0.5	Уравнение плохого качества

Для определения значимости уравнения регрессии используется критерий Фишера F по уравнению (9):

$$F = (R^2/(1 - R^2)) \cdot ((N - m - 1)/m). \quad (9)$$

$$F = (0.72/(1 - 0.72)) \cdot ((23 - 6 - 1)/6) = 6.79. \quad (10)$$

Полученное значение критерия Фишера сравнивается с табличным значением [11], где $k_1 = m$, $k_2 = N - m - 1$.

Соответственно, $k_1 = 6$, $k_2 = 23 - 6 - 1 = 16$, $F_{\text{табл}} = 2,74 < 6,79$, следовательно уравнение значимо.

Среднеквадратичное отклонение (СКО) показывает рассеивание значений относительно их среднего значения. Оно показывает, насколько далеко каждое значение выборки отклоняется от среднего значения. Рассчитывается по следующей формуле:

$$S = \sqrt{\sum (y_{\text{расч}} - \overline{y_{\text{расч}}})^2 / N}, \tag{11}$$

где $\overline{y_{\text{расч}}}$ – среднее значение расчетного ОЧИМ.

$$S = \sqrt{\sum ((94,7 - 94,2)^2 + \dots + (94,5 - 94,2)^2) / 23} = 0,6. \tag{12}$$

Чем меньше значение СКО, тем меньше разброс значений.

Аналогичные расчеты были проведены для выборки 2 и 3.

Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов

Выборка	Уравнение	Показатель			
		σ^2	R^2	F	S
1	$y_i = -6.079 + 0.005x_{1i} + 0.454x_{2i} - 0.280x_{3i} + 2.314x_{4i} + 0.004x_{5i} - 0.026x_{6i}$	0.2	0.7	6.79 (табл. 2.74)	0.6
2	$y_i = 9.209 + 0.388x_{1i} - 0.089x_{2i} - 0.137x_{3i} - 1.731x_{4i} + 0.007x_{5i} + 0.022x_{6i}$	0.1	0.7	6.70 (табл. 2.70)	0.4
3	$y_i = 19.862 + 0.013x_{1i} + 0.470x_{2i} - 0.225x_{3i} - 2.063x_{4i} - 0.003x_{5i} - 0.460x_{6i}$	0.1	0.9	7.78 (табл. 3.87)	0.6

x_{1i} – температура на входе в первый реактор; x_{2i} – температура на входе во второй реактор;
 x_{3i} – температура на входе в третий реактор; x_{4i} – среднее значение давления в системе;
 x_{5i} – кратность циркуляции ВСГ; x_{6i} – расход сырья на установку

Исходя из таблицы, наилучшие показатели характерны для уравнения, полученного по данным выборки 3.

По рис. 4–6 также можно заметить, что рассчитанные ОЧИМ ближе к исходным при уравнении регрессии по данным выборки 3.

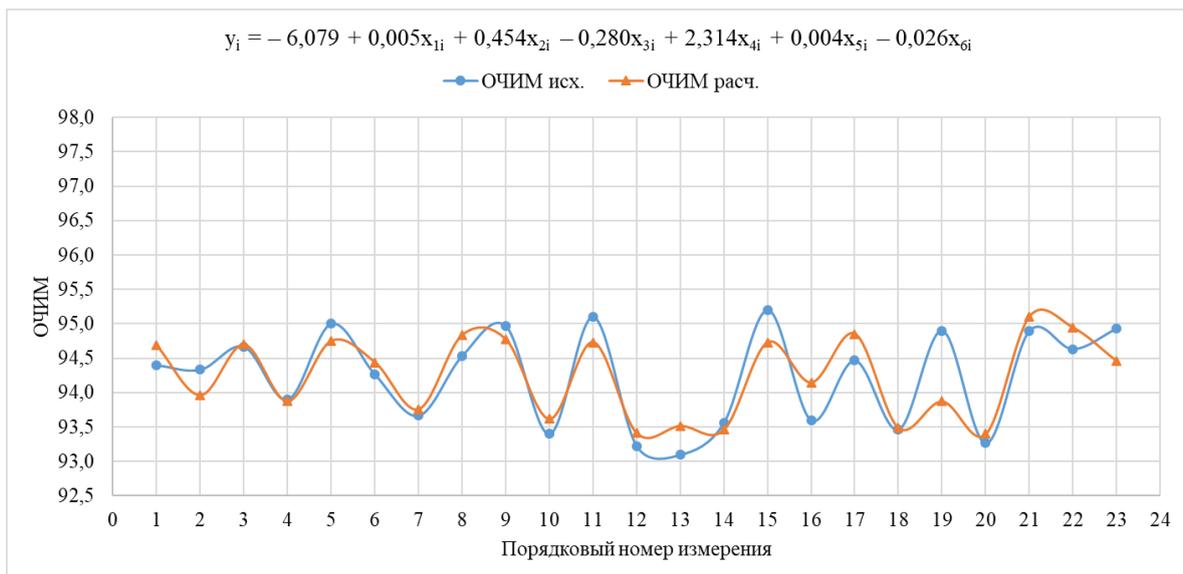
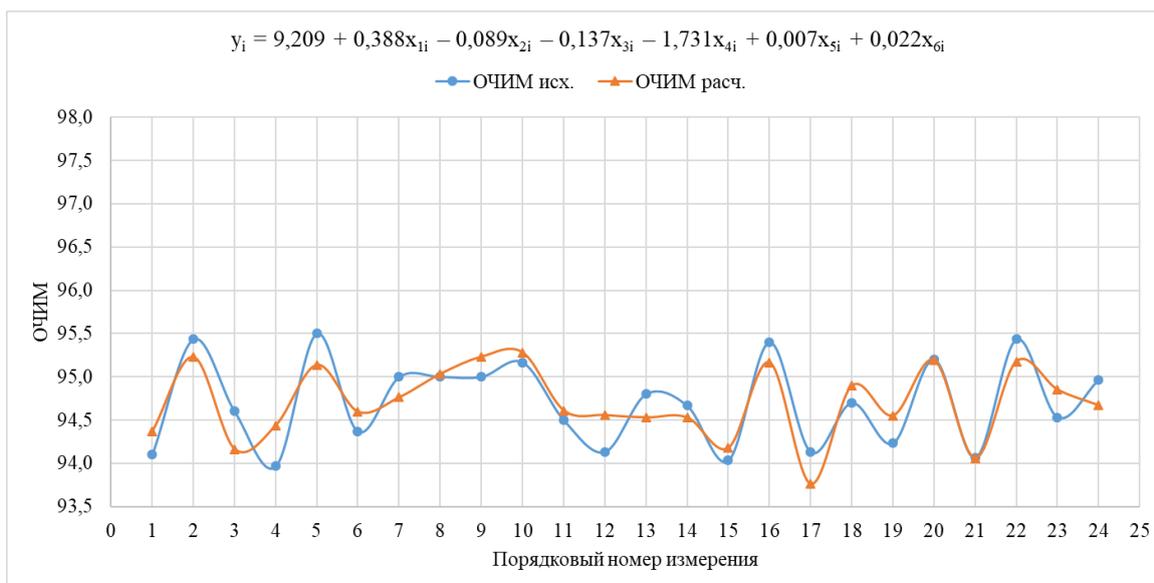
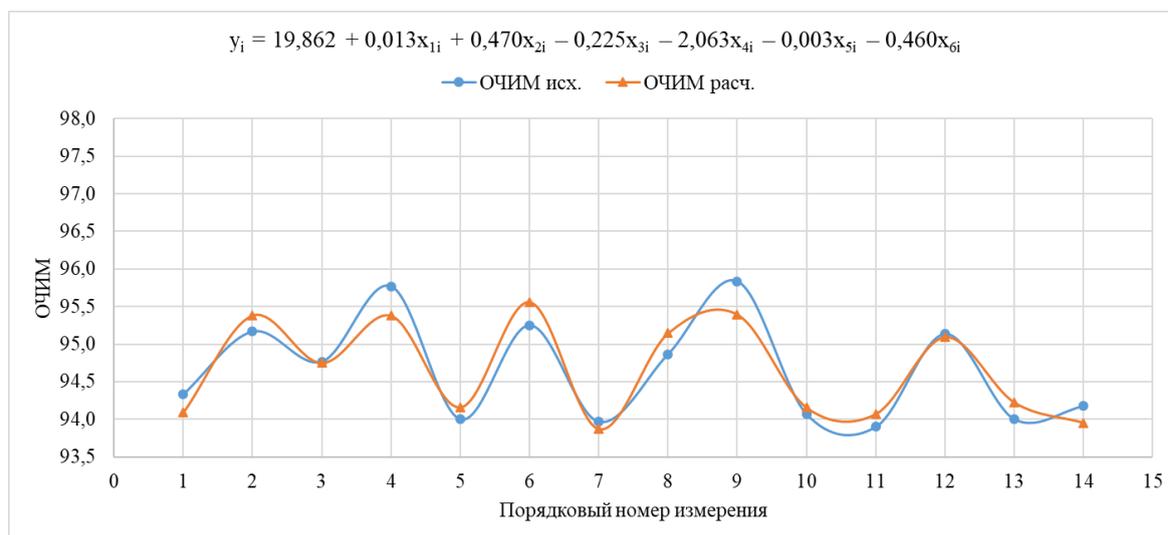


Рис. 4. График распределения ОЧИМ_{исх.} и ОЧИМ_{расч.} выборки 1.

По рис. 4 наблюдается близкая динамика изменений расчетного и исходного ОЧИМ.

Рис. 5. График распределения ОЧИМ_{исх.} и ОЧИМ_{расч.} выборки 2.

Из рис. 5 можно заметить, что значения расчетного ОЧИМ сильнее отклоняются от исходного, чем на рис.4.

Рис. 6. График распределения ОЧИМ_{исх.} и ОЧИМ_{расч.} выборки 3.

На рис. 6 визуально наблюдается, что значения ОЧИМ_{расч.} наиболее близки к исходным значениям ОЧИМ.

Компромиссные оптимальные значения ОЧИМ и выхода риформата

Компромиссы между выходными параметрами процесса можно увидеть благодаря множеству Парето [12]. Множество Парето – это набор значений, соответствующий принципу Парето – в результате не все цели будут улучшены, хотя бы одна цель будет иметь отрицательный результат. Благодаря получаемому фронту Парето можно определить оптимальные значения параметров.

Таблица 4

Полученные в результате анализа данные

Расход сырья на установку, м ³ /ч	Температура на входе в первый реактор, °С	Температура на входе во второй реактор, °С	Температура на входе в третий реактор, °С	Среднее значение давления в системе, МПа	Кратность циркуляции ВСГ, нм ³ /м ³	Выход риформата, % масс.	ОЧИМ
99.78	481.01	481.04	458.27	2.83	1043.84	89.69	95.5
99.98	481.20	481.18	459.05	2.84	1036.53	91.30	95.2
100.36	481.14	480.87	457.74	2.82	1015.51	93.34	94.8
99.40	481.17	480.93	458.10	2.87	1016.18	91.56	95.1
80.28	482.51	481.89	465.51	2.92	1167.88	83.01	97.1
73.19	488.05	488.31	466.59	2.25	1093.43	86.99	96.7

Для построения множества Парето были выбраны такие параметры, как ОЧИМ и выход риформата в % масс. Проанализированы данные технологического режима работы установки каталитического риформинга, полученные за 1 год. Полученные в результате анализа данные представлены в *табл. 4*.

Полученный фронт Парето за год представлен на *рис. 7*.

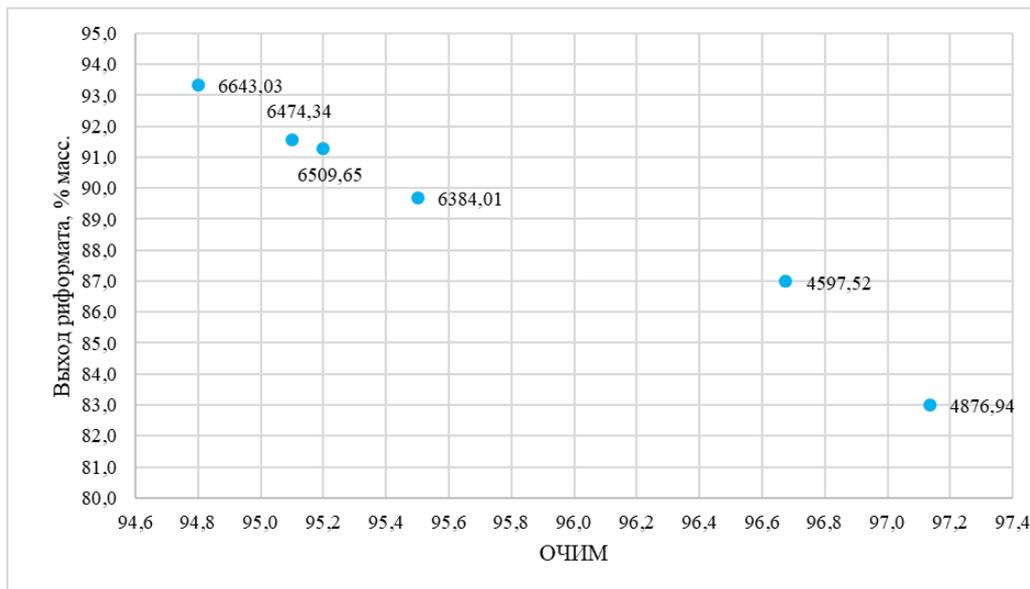


Рис. 7. Фронт Парето за год.

Оптимальные значения показателей были выбраны по такому показателю, как октано-тонна/ч. Рассчитывается по следующей формуле:

$$OT = OCHIM \cdot V, \tag{13}$$

где OT – октано-тонна/ч; ОЧИМ – октановое число, полученное исследовательским методом; V – выход риформата, т/ч.

Рассчитанные значения представлены в *табл. 5*.

Таблица 5

Рассчитанные значения октано-тонны/ч

Выход риформата, % масс.	ОЧИМ	Октано-тонна/ч
89.69	95.5	6384.01
91.30	95.2	6509.65
93.34	94.8	6643.03
91.56	95.1	6474.34
83.01	97.1	4876.94
86.99	96.7	4597.52

Наибольшее значение (6643.03 октано-тонн/ч) характерно для ОЧИМ = 94.8 и выхода риформата = 93.34% масс. Этим показателям соответствует следующий режим работы установки:

- расход сырья на установку = 100.36 м³/ч;
- температура на входе в первый реактор = 481.14 °С;
- температура на входе во второй реактор = 480.87 °С;
- температура на входе в третий реактор = 457.74 °С;
- среднее значение давления в системе = 2,82 МПа;
- кратность циркуляции ВСГ = 1015.51 нм³/м³.

Заключение

В ходе исследования промышленного риформинга бензина проведен анализ исходных данных и изучены принципы построения многофакторных регрессионных уравнений. Проведена работа по предварительной подготовке для математической обработки промышленных данных. Проведен многофакторный анализ зависимости ОЧИМ от определяющих параметров и получено несколько уравнений зависимости ОЧИМ от 6 параметров. Наилучшие результаты были получены у уравнения регрессии, полученного из выборки 3. У данного уравнения дисперсия адекватности минимальна (0.1), коэффициент детерминации равен 0.9, что говорит о том, что уравне-

ние хорошо описывает процесс. Критерий Фишера больше табличного значения ($7.78 > 3.87$), т.е. уравнение значимо, и среднеквадратичное отклонение составляет 0.6. Все параметры, которые участвуют в полученной модели, имеют технологическое обоснование влияния данных параметров на формирование ОЧИМ.

При помощи фронта Парето были получены значения режима работы установки, при которых достигаются наиболее оптимальные показатели ОЧИМ (94.8) и выхода риформата (93.34% массе):

- расход сырья на установку = 100.36 м³/ч;
- температура на входе в первый реактор = 481.14 °С;
- температура на входе во второй реактор = 48.87 °С;
- температура на входе в третий реактор = 457.74 °С;
- среднее значение давления в системе = 2.82 МПа;
- кратность циркуляции ВСГ = 1015.51 нм³/м³.

Фронт Парето режима работы промышленной установки риформинга позволит в дальнейшем получать компримисные значения между выходом риформата и ОЧИМ для различных нужд (производство высокооктанового компонента или сырья для нефтехимии), т.к. чем выше значение выхода риформата, тем меньше значение октанового числа и наоборот. Методы построения фронта Парето можно использовать для любых параметров различных процессов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института нефтехимии и катализа УФИЦ РАН (тема No. FMRS-2022-0078).

ЛИТЕРАТУРА

1. ТР ТС 013/2011. Технический регламент Таможенного союза «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту» [электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902307833> (дата обращения: 07.04.2024).
2. Ахметов С. А. Технология переработки нефти и газа: Учебное пособие для вузов. Уфа: Гилем, 2012. 672 с.
3. Зайцева Е. С., Губайдуллин И. М. Математическая модель расчета октанового числа бензинов каталитического риформинга с групповой кинетикой // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ имени Е. В. Воскресенского: IX Междунар. научная молодежная школа-семинар, Саранск, 8–11 октября 2020 г. 2020. С. 60–61.
4. Коледина К. Ф., Губайдуллин И. М., Зайнуллин Р. З. Математическое моделирование неизотермического процесса каталитического риформинга бензина // Математическое моделирование процессов и систем: Материалы VIII Междунар. молодежной научно-практ. конф., Уфа, 04–07 октября 2018 г. Ч. II. 2018. С. 197–205.
5. Зайнуллин Р. З., Коледина К. Ф., Губайдуллин И. М. и др. Кинетическая модель каталитического риформинга бензина с учетом изменения реакционного объема и термодинамических параметров // Кинетика и катализ. 2020. Т. 61, №4. С. 550–559.
6. Dong X. J., Shen J. N., Ma Z. F. et al. Robust optimal operation of continuous catalytic reforming process under feedstock uncertainty // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. Vol. 47. No. 84. P. 35641–35654.
7. Патент №2736727 С1 Российская Федерация, МПК С10G 35/24. Способ управления процессом каталитического риформинга: №2020119326; заявл. 10.06.2020; опубл. 19.11.2020 / А. П. Вережкин, Т. М. Муртазин, О. В. Кирюшин [и др.]; заявитель А. Г. Ложкин.
8. Ганцев А. В., Аюпов Э. Р. Применение цеолитсодержащего катализатора в процессе каталитического риформинга // Universum: химия и биология. 2019. №12(66). С. 65–67.
9. Шагинян А. А. Возможности модернизации установок каталитического риформинга // Вестник магистратуры. 2020. №5–3. С. 38.
10. Айдочкина М. А., Отряскина Т. А. Совершенствование процесса очистки водородосодержащего газа на установке каталитического риформинга // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в 3-х ч., Комсомольск-на-Амуре, 06–10 апреля 2020 г. Ч. 1. 2020. С. 6–8.
11. Табличное значение F-критерия Фишера [электронный ресурс]. URL: http://www.mz.ru/econometrica/tablica_fishera.php (дата обращения: 10.04.2024).
12. Koledina K. F., Gubaydullin I. M., Zagidullin S. G. et al. Multicriteria optimization of gasoline catalytic reforming temperature regime based on a kinetic model with grouped hydrocarbons // Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis. 2022. Vol. 135. No. 1. P. 135–153.

Поступила в редакцию 03.05.2024 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2024.2.6

**MULTIFACTORIAL OPTIMIZATION OF THE INDUSTRIAL PROCESS
OF CATALYTIC REFORMING**© **I. I. Mannanova**^{1*}, **V. R. Kifyatov**¹, **R. Z. Zainullin**², **I. M. Gubaidullin**^{1,3}

¹*Ufa State Petroleum Technological University
1 Kosmonavtov St., 450064 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

*LLC "Ishimbay Specialized Chemical Catalyst Plant"
6 Levyi bereg St., 453203 Ishimbay, Republic of Bashkortostan, Russia.*

*Institute of Petrochemistry and Catalysis, Ufa Federal Research Center of RAS
141 Oktyabrya Ave., 450075 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

**Email: in.mannanova.in55@gmail.com.*

In the article, the authors analyzed the data of the technological mode of operation of the catalytic reforming installation for one year. The data represent technological parameters such as the temperature of the raw material at the entrance to the first reactor, the pressure at the entrance to the first reactor, etc. The data was averaged to the daily average. Non-operational parameters and downtime periods have been identified and excluded. Regression analysis was carried out by the method of multivariate linear regression in order to obtain a mathematical model of the installation. The use of this method allows you to take into account the influence of several parameters at the same time. A Pareto front has been built to identify the optimal operating mode of the installation.

Keywords: catalytic reforming, mathematical modeling, regression analysis, multifactorial regression, Pareto front.

Received 03.05.2024 г.