

УДК 665.642.44

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СЫРЬЯ ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ПРОЦЕСС КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА

Пчелинцева Инна Вагизовна¹,
PchelincevalV@oilteam.tomsk.ru

Чернякова Екатерина Сергеевна²,
Sharova@tpu.ru

Красовская Ольга Константиновна²,
okk3@tpu.ru

Кокшаров Антон Георгиевич³,
antonk11@mail.ru

¹ ООО ИЦ «ГазИнформПласт»,
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 8/8.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

³ ООО «КИНЕФ»,
Россия, 187110, г. Кириши, ш. Энтузиастов, 1.

Актуальность исследования обусловлена возможностью модернизации процесса получения высокооктановых топлив путем подбора и варьирования сырья на базе действующего предприятия, а также на этапе его проектирования.

Цель заключается в анализе влияния сырья газоконденсатного месторождения на качественные и количественные характеристики продукта – риформата, являющегося основой бензина.

Объектом исследования являются составы сырья трех газоконденсатных месторождений Западной и Восточной Сибири.

Методы: хроматографический анализ дегазированного конденсата для детального определения состава до C₁₃; математическое моделирование для исследования влияния различного сырья на показатели каталитического риформинга.

Результаты. Разработана математическая модель каталитического риформинга полурегенеративного типа. С её помощью исследовано влияние состава сырья на выход и качество риформата. В качестве сырья использован дегазированный конденсат с трех различных газоконденсатных месторождений Западной и Восточной Сибири. Дегазированный конденсат получен методом стандартной сепарации в исследовательской лаборатории. Приведен индекс сырья, обозначающий преобладание определенной углеводородной группы в составах трех дегазированных конденсатов. Выявлено, что применение сырья с газоконденсатных месторождений с минимальным содержанием парафиновых углеводородов и высоким значением нафтеновых и ароматических углеводородов приводит к увеличению выхода ароматических углеводородов на 20 % мас., повышению выхода риформата на 3 % мас., увеличению октанового числа на 7–8 пунктов и повышенному коксообразованию на 0,5 % мас. С использованием математической модели проанализировано изменение состава бензиновой фракции в процессе эксплуатации газоконденсатного месторождения в течение пяти лет. Установлено, что увеличение срока эксплуатации месторождения оказывает отрицательное воздействие на каталитическую систему риформинга в связи с увеличением ароматических соединений в своем составе.

Ключевые слова:

каталитический риформинг, состав сырья, газоконденсатное месторождение, математическая модель, выход продукта, октановое число.

Введение

Бензин является востребованным топливом для различных типов современных двигателей. В России добыча нефти с учетом газового конденсата в декабре 2021 г. составила 46,2 млн т, что по сравнению с декабрем 2020 г. увеличилось на 8,6 %. Всего за 2021 г. добыто 524 млн т нефти с учетом газового конденсата, что на 2,1 % больше, чем за 2020 г. [1–5].

Каталитический риформинг – один из основных процессов получения высококачественных бензинов и ароматических углеводородов. Основные цели процесса:

1) увеличение октанового числа бензинов для получения неэтилированного высокооктанового продукта;

2) получение побочного продукта – индивидуальных ароматических углеводородов (бензол, толуол, ксилол);

3) получение ВСГ для промышленных процессов с потреблением водорода (гидроочистка, гидрокрекинг, изомеризация и т. д.).

Выделяют три типа технологического оформления процесса риформинга: полурегенеративный, циклический и непрерывный. Наибольшее распространение как в мире, так и в России получил процесс полурегенеративного типа, или со стационарным слоем катализатора – около 60 % от общемирового объема [6]. На рис. 1 приведена его технологическая схема.

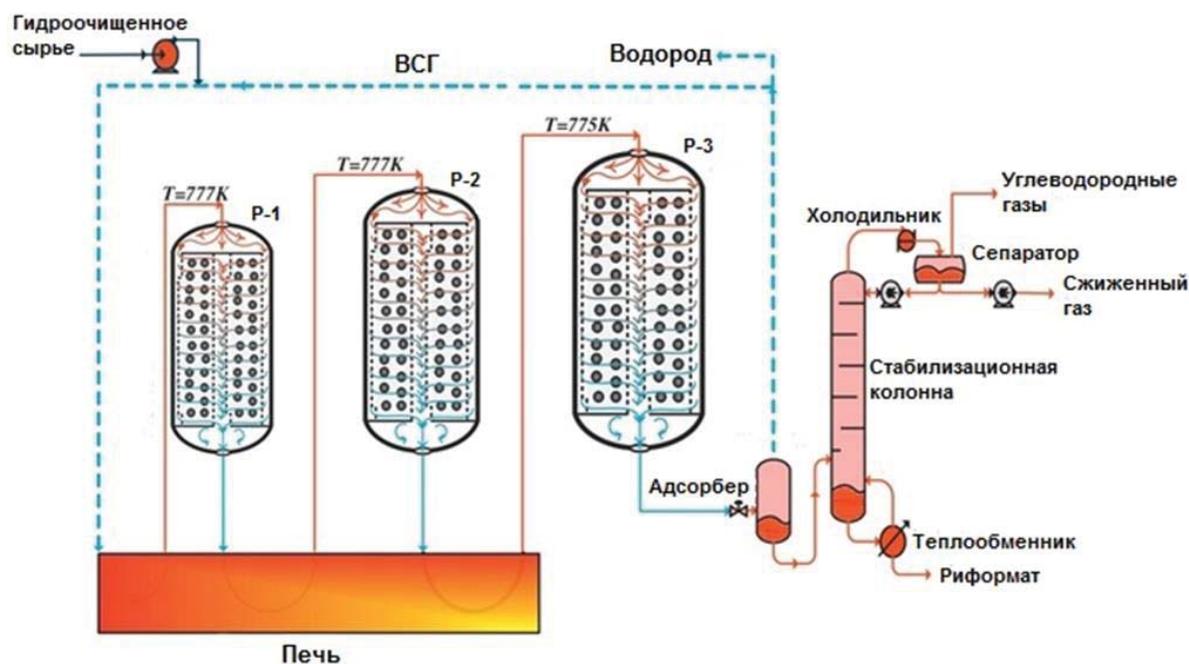


Рис. 1. Технологическая схема установки каталитического риформинга со стационарным слоем катализатора [6]
Fig. 1. Technological scheme of semi regenerative (SRR) catalytic reforming unit

Сырье, смешиваясь с водородсодержащим газом, поступает последовательно в три (иногда четыре) реактора, проходя подогрев в печи между ними. В первом реакторе преимущественно протекают реакции дегидрирования шестичленных нафтен, которые характеризуются высокими скоростями и эндотермическим эффектом. Изомеризация пятичленных нафтен (метилциклопентана и его гомологов) наиболее активно проходит в первых двух реакторах и в небольшой степени – в последнем. Парафины подвергаются дегидроциклизации особенно значительно во втором и третьем реакторах. В последнем реакторе, кроме того, интенсивно протекают реакции гидрокрекинга углеводородов. Перечисленные реакции проходят на бифункциональном катализаторе, в основном Pt-Re, ускоряющем эти реакции в несколько раз [6–9].

На процесс каталитического риформинга влияет множество факторов, от которых зависит будущий состав целевого продукта. К таким факторам можно отнести ряд технологических параметров (температура, давление, расход водородсодержащего газа), а также компонентный состав сырья. Технологические условия процесса каталитического риформинга полурегенеративного типа: давление 1,3–3,0 МПа, температура на входе в реактор 480–530 °С.

В качестве сырья для каталитического риформинга используют прямогонные бензиновые фракции, реже – лигроиновые [6]. Выбор сырья напрямую зависит от целевого назначения процесса и типа установки, используемой на предприятии. Углеводородный состав сырья напрямую зависит от геологических свойств месторождения и его возраста, следовательно, использование бензиновой фракции разнообразных месторождений приводит к получению продукта с различными характеристиками. Обычно сырьем для изучаемого процесса служит нефть, но в данной работе исследова-

но сырье с газоконденсатных месторождений. Газовый конденсат является ценным химическим сырьем, а свойства стабильного конденсата (сепарированного от газа) близки к свойствам легкой нефти [10].

Целью данной работы является анализ влияния сырья трех разных газоконденсатных месторождений на качественные (содержание ароматических углеводородов и октановое число) и количественные (выход риформата) характеристики катализата – целевого продукта высокооктанового бензина.

Для достижения поставленной цели были реализованы задачи:

- 1) исследование влияния состава сырья различных газоконденсатных месторождений на эффективность процесса получения высокооктановых топлив;
- 2) анализ изменения состава бензиновой фракции в процессе эксплуатации газоконденсатного месторождения;
- 3) оценка влияния изменения состава на качественные и количественные характеристики целевого продукта.

Поставленные задачи были реализованы при помощи хроматографических исследований дегазированного конденсата для определения состава исследуемого сырья, анализ влияния состава сырья на процесс был реализован с помощью метода математического моделирования.

О методике математического моделирования

Методы математического моделирования начали интенсивно развиваться, начиная с 1960-х г. [6, 9]. Модель описывает математическое представление реального технологического объекта, исследование которого с помощью компьютерной системы, построенной на базе модели, позволяет решить задачи повышения эффективности и позволяет прогнозировать

поведение реального объекта, тем не менее сама модель всегда представляет собой некоторую степень его идеализации.

Каталитический риформинг – сложный технологический процесс с точки зрения изучения и моделирования в силу ряда причин:

- 1) многокомпонентный состав сырья и продукта (более 300 компонентов);
- 2) большое количество реакций различных порядков;
- 3) бифункциональный состав катализатора;
- 4) процессы дезактивации катализатора, осложняющие процесс.

Создание математической модели каталитического риформинга основано на кинетическом и термодинамическом анализе реакций, протекающих в процессе. Учесть все компоненты, которых несколько сотен, и все реакции превращения, которые они проходят на катализаторе, очень сложно. Для облегчения задачи составления модели приняты некоторые допущения:

- формализованный механизм превращения компонентов (согласно ему, все компоненты исходной смеси классифицированы в гомологические группы, называемые псевдокомпонентами);
- модель реактора идеального вытеснения;
- адиабатический режим реактора.

Подробный разбор поэтапного создания математической модели каталитического риформинга представлен в нескольких работах [11–18]. Окончательный вид математической модели каталитического риформинга со стационарным слоем катализатора представлен в виде системы уравнений материально-го и теплового баланса:

$$\begin{cases} G_c \frac{\partial C_i}{\partial Z} + G_c \frac{\partial C_i}{\partial V} = \sum_{j=1}^m a_j \cdot r_j \\ G_c \frac{\partial T}{\partial V} + G_c \frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{1}{\rho \cdot C_p^{mix}} \sum_{j=1}^m a_j \cdot r_j \cdot \left(\frac{RT}{P} \right) \cdot \Delta H_j \end{cases} \quad (1)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} Z=0, C_i=C_{i0}, T=T_{en}; \\ V=0, T=T_{en}, C_i=C_{i0}, \end{aligned} \quad (2)$$

где G_c – расход сырья, м³/ч; C_i – концентрация i -го компонента, моль/м³; Z – объём переработанного сырья с момента загрузки свежего катализатора (новый катализатор, регенераций не проводилось), м³; V – объём катализатора в реакторах, м³; a_j – активность катализатора, моль/м³·ч; i – номер компонента в смеси; j – номер реакции согласно формализованному механизму; T – температура, К; ρ – плотность, моль/м³; C_p^{mix} – теплоёмкость смеси, кДж/моль·К; k_j – константа j -й реакции, л/моль·ч; ΔH – теплота j -й реакции, кДж/моль; R – универсальная газовая постоянная, 8,314 МПа·л/моль·К; P – давление, МПа.

На основании разработанной модели (уравнения (1), (2)) была написана программа Aktiv [13–16], с помощью которой можно рассчитать показатели работы каталитического риформинга: насколько эффективно используется тот или иной катализатор, технологический режим, и спрогнозировать потенциальный выход продукта при изменении каких-либо параметров. Исследованию влияния режимов и подбору катализаторов, а также расчету основных показателей исследуемого

процесса и выводам об их эффективности посвящено много работ [9, 11–16].

Функция учета состава сырья также заложена в математической модели и представлена в виде зависимости:

$$w = k_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \cdot f(C), \quad (3)$$

где k_0 – скорость реакции; E – энергия активации для реакции; R – универсальная газовая постоянная, 8,314 м³·Па/К·моль; T – абсолютная температура, К; $f(C)$ – функция учета сырья.

Углеводородный состав сырья определяет реакционную способность компонентов и скорость целевых и побочных реакций согласно уравнению (3).

Таблица 1. Технологические параметры установки

Table 1. Technological parameters of SRR unit

Параметр Parameter	Численное значение Numerical value				
Объем переработанного сырья, т Volume of processed feedstock, tons	31572	58178	85982	113150	132458
Расход сырья, м ³ /ч Feedstock consumption, m ³ /h	115	114	115	111	102
Температура на входе в реактор Reactors inlet temperature, °C	493				
Давление, МПа Pressure, MPa	1,4				
Расход ВСГ, м ³ /ч HCG consumption, m ³ /h	205000				
Количество реакторов Number of reactors	3				

Таблица 2. Физико-химические свойства катализатора

Table 2. Specification of catalyst properties

Показатели Properties of a catalyst	RG-682 (Axens)
Форма/Shape	Экструдат Extrudate
Диаметр, мм/Diameter, mm	1,6
Насыпная плотность при плотной загрузке, кг/м ³ Packed density, kg/m ³	700
Удельная поверхность, м ² /г/Surface area, m ² /g	220
Общий объём пор, см ³ /г/Pore volume, sm ³ /g	0,6
Платина, % мас./Pt, % wt. Рений, % мас./Re, % wt. Третий элемент, промотор Promoted by the third element	0,25 0,40 Да Yes
Активность – октановое число стабильного риформата по исследовательскому методу Activity is the research octane number of a stable reformat	98,0 ¹
Селективность – выход стабильного риформата, % мас. Selectivity is the yield of a stable reformat, % wt.	88,6 ¹

Определенный уровень показателей зависит от качества сырья. Данные значения предполагают использование сырья с повышенным содержанием предельных углеводородов – 43,8 % мас., углеводородов циклического строения – 40,1 % мас. и ароматических – 16,1 % мас.

A certain level of parameters depends on the feedstock quality. These values assume the feedstock using with a high content of saturated hydrocarbons – 43,8 % wt., hydrocarbons of a cyclic structure – 40,1 % wt. and aromatic hydrocarbons – 16,1 % wt.

В качестве исходных данных для расчетов используются данные хроматографического анализа сырья (нафты) и продукта (риформата), а также набор технологических параметров работы промышленной установки каталитического риформинга полурегенеративного типа. В табл. 1, 2 приведены основные характеристики технологического режима работы и применяемых на установке катализаторов. Технологическая схема установки показана на рис. 1. Краткая характеристика сырья на установке представлена в табл. 6, а основные показатели полученного продукта – в табл. 5.

Данные нафты и катализата, используемые в качестве исходных, а также технологические параметры установки и катализатора получены в готовом виде с предприятия в рамках сотрудничества по исследованию нефтехимических процессов и поиску оптимизационных решений.

Формирование исходных данных

Данные для расчетов в программе Aktiv получены хроматографическим методом исследования по ГОСТ Р 52714-2018 «Бензины автомобильные. Определение индивидуального и группового углеводородного состава методом капиллярной газовой хроматографии» [19]. Сущность метода заключается в хроматографическом разделении бензина на капиллярной колонке с неполярной неподвижной фазой с последующей регистрацией углеводородов пламенно-ионизационным детектором (ПИД) и автоматизированной обработкой полученной информации с помощью программного обеспечения. Представительный образец бензина вводят в газовый хроматограф, оснащенный капиллярной колонкой. Под действием газа-носителя – гелия – образец проходит через колонку, в которой его компоненты разделяются. Компоненты регистрирует ПИД. Сигнал детектора обрабатывается интегрирующим компьютером. Идентификацию пиков компонентов (углеводородов и оксигенатов) проводят вручную с помощью соответствующего компьютерного программного обеспечения (Хроматэк Аналитик 3.0). Массовая концентрация каждого углеводородного компонента рассчитывается по нормализованной площади и коэффициентам чувствительности [19, 20].

Данные дегазированного конденсата получены в исследовательском центре «ГазИнформПласт» описанным выше хроматографическим методом. Дегазированный или стабильный конденсат получен из нестабильного конденсата, содержащего газовую фазу. Разделение нестабильного конденсата происходит методом стандартной сепарации в исследовательском центре [20].

После расшифровки пиков и определения массового содержания углеводородов в образцах в программе Aktiv на основании имеющейся базы компонентов в автоматическом режиме формируются файлы для расчёта. Математическая модель учитывает 69 компонентов с отличающейся детонационной стойкостью. Так как количество расшифрованных компонентов значительно больше (более 300), происходит группировка по основному параметру, который ха-

рактеризует способность топлива противостоять самовоспламенению. То есть компоненты, имеющие близкие показатели, объединяются в одну группу для упрощения расчетов. После формирования расчетных файлов при помощи программы Aktiv и имеющихся технологических данных происходит расчет основных характеристик каталитического риформинга, представленных в экспериментальной части данной статьи.

Верификация математической модели

Для проверки адекватности математической модели, положенной в основу Aktiv, были проведены сравнения полученных расчетных и экспериментальных значений (табл. 3, 4).

Таблица 3. Сравнение между расчетными и экспериментальными значениями показателей каталитического риформинга

Table 3. Comparison between experimental and calculated data

Октановое число по исследовательскому методу Research octane number		Выход катализата, % мас. Yield, % wt.	
Эксперимент Experiment	Расчет Calculated	Эксперимент Experiment	Расчет Calculated
94,1	95,5	83,0	84,4
94,3	95,3	82,1	83,0
91,7	93,0	83,7	84,5

Таблица 4. Расчетные и экспериментальные значения группового состава исходного сырья (нафты)

Table 4. Calculated and experimental values of the feedstock group composition (naphtha)

н-алканы n-alkanes		и-алканы i-alkanes		нафтен-5 naphthenes		нафтен-6 naphthenes		арены aromatics	
% мас./% wt.									
Расч. Calc.	Эксп. Exp.	Расч. Calc.	Эксп. Exp.	Расч. Calc.	Эксп. Exp.	Расч. Calc.	Эксп. Exp.	Расч. Calc.	Эксп. Exp.
7,11	8,05	24,3	22,3	2,63	2,36	0,80	0,82	65,2	65,2
8,08	8,13	24,1	22,9	2,42	2,40	0,80	1,00	64,6	64,7
8,77	9,12	26,2	24,7	2,61	2,71	0,92	1,09	61,5	61,5

Погрешность между расчетными и экспериментальными значениями составляет менее 1 % мас., что позволяет судить об адекватности модели и расчетов, полученных с её помощью.

Анализ влияния состава сырья газоконденсатных месторождений на выход и качество продукта

Расчет показателей выполнялся в режиме «Исследование влияния состава сырья» программы Aktiv, по результатам которого были получены данные, представленные в табл. 5. В качестве количественной характеристики риформата выступает параметр выхода риформата, качественной – октановое число и содержание ароматических соединений.

На основании представленных в табл. 5 данных можно сделать вывод, что использование сырья различного состава приводит к получению продукта с различным октановым числом, выходом, а также содержанием ароматических углеводородов.

Таблица 5. Характеристики риформата, полученные при исследовании влияния состава сырья

Table 5. Characteristics of the reformat obtained in the studying of the feedstock composition impact

Характеристика Characteristic	Объем переработанного сырья, т Volume of processed feedstock, tons				
	31572	58178	85982	113150	132458
Исходное сырье (нафта)/Feedstock (naphtha)					
Выход риформата, % мас. Yield, % wt.	87,74	87,61	87,67	87,55	87,31
Ароматические УВ, % мас. Aromatic hydrocarbons, % wt.	63,70	63,80	63,69	63,74	63,75
Кокс, % мас. Coke, % wt.	0,17	0,32	0,47	0,62	0,71
Октановое число Octane number	95,80	95,90	95,80	95,80	95,80
Образец сырья «kr» (дегазированный конденсат) Sample of feedstock «kr» (degassed condensate)					
Выход риформата, % мас. Yield, % wt.	81,32	81,43	81,53	81,06	87,31
Ароматические УВ, % мас. Aromatic hydrocarbons, % wt.	58,52	58,06	57,87	57,92	58,05
Кокс, % мас. Coke, % wt.	0,30	0,55	0,76	1,03	1,19
Октановое число Octane number	93,60	93,40	93,30	93,30	93,40
Образец сырья «ma» (дегазированный конденсат) Sample of feedstock «ma» (degassed condensate)					
Выход риформата, % мас. Yield, % wt.	89,91	90,01	90,05	89,97	89,77
Ароматические УВ, % мас. Aromatic hydrocarbons, % wt.	83,33	82,92	82,83	82,91	83,09
Кокс, % мас./Coke, % wt.	0,34	0,62	0,89	1,16	1,32
Октановое число Octane number	104,10	103,90	103,80	103,90	104,00
Образец сырья «upn» (дегазированный конденсат) Sample of feedstock «upn» (degassed condensate)					
Выход риформата, % мас. Yield, % wt.	90,61	90,71	90,75	90,67	90,48
Ароматические УВ, % мас. Aromatic hydrocarbons, % wt.	83,49	83,11	83,01	83,09	83,26
Кокс, % мас./Coke, % wt.	0,33	0,60	0,86	1,12	1,26
Октановое число Octane number	104,30	104,10	104,10	104,10	104,20

Описывая полученные результаты, необходимо отметить важный параметр – индекс сырья, который прямо пропорционален содержанию парафиновых углеводородов и обратно пропорционален сумме нафтеновых и ароматических.

$$\text{Индекс сырья} = \frac{\sum(n\text{-парафины} + i\text{-парафины})}{\sum(\text{нафтены} + \text{ароматика})}. \quad (4)$$

Если суммы групп углеводородов примерно одинаковые, показатель будет стремиться к 1, тогда как если показатель меньше 1, это свидетельствует, что в данном виде сырья преобладают нафтеновые углеводороды. Соответственно, при показателе из формулы (4) большем, чем 1, можно судить о доминировании парафинов. Сырье с преобладанием нафтенов представляет наибольшую ценность для риформинга среди остальных, потому что нафтеновые углеводороды превращаются в ароматические углеводороды с большей селективностью, чем парафиновые. Рассчитанный по формуле (4) индекс исследуемого сырья, а также его характеристика согласно формуле (4) представлены в табл. 6.

Исходя из расчётов, можно заметить, что при увеличении индекса сырья и, соответственно, содержа-

ния парафиновых углеводородов (алканов) количество ароматических углеводородов в риформате снижается. Данное явление объяснимо тем, что парафиновые углеводороды, присутствующие в составе сырья, на активных центрах катализатора, вступают в сложные реакции ароматизации, константа скорости которых в среднем равна $1,5 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ [9]. При уменьшении индекса сырья, а, следовательно, и увеличении в составе циклических углеводородов, качество риформата заметно увеличивается, так как последние вступают в реакции дегидрирования, которые протекают в одну стадию. В результате анализа исследуемых образцов риформатом, обладающим максимальным содержанием ароматических углеводородов (83,49 % мас.), является риформат переработки образца сырья «upn» с минимальным содержанием парафиновых углеводородов и высоким значением нафтеновых и ароматических углеводородов, значения которых составили 27,01 и 20,10 % мас. соответственно.

Таблица 6. Индекс сырья исследуемых образцов

Table 6. Indexes of feedstock samples

Образец сырья Feedstock sample	Индекс сырья Feedstock index	Характеристика Characteristics
Нафта (исходное) Naphtha (initial)	1,67	Повышенное содержание парафиновых и нафтеновых углеводородов Increased content of alkanes and naphthenic hydrocarbons
upn	0,40	Высокое содержание ароматических и нафтеновых углеводородов High content of aromatic and naphthenic hydrocarbons
ma	0,42	Высокое содержание ароматических углеводородов при низком содержании предельных углеводородов High content of aromatic hydrocarbons with low content of alkanes
kr	2,62	Повышенное содержание парафиновых углеводородов Increased content of alkanes

Риформат переработки исходного сырья (нафты) отличается максимальным содержанием нафтеновых углеводородов из исследуемых образцов – 28,5 % мас., однако же количество ароматических соединений в катализате сравнительно мало. Данный образец сырья характеризуется высоким количеством парафинов нормального и изостроения, содержание которых составляет 28,21 и 34,22 % мас. соответственно. Преобразование данных углеводородов в компоненты риформата, обладающие высокой детонационной стойкостью, замедляет процесс ароматизации и, соответственно, снижает качественные характеристики риформата.

Помимо содержания ароматических углеводородов в составе продукта, также качественной характеристикой процесса каталитического риформинга является накопление кокса на поверхности катализатора RG-682. По результатам исследования можно сделать вывод, что данный параметр напрямую зависит от процентного содержания в сырьевом потоке аромати-

ческих углеводородов. Данные компоненты сырья при температуре риформинга 493 °С способны вступать в реакции конденсации. Продуктами данной реакции являются неопределенные промежуточные продукты уплотнения, вступающие в реакции коксообразования. Из этого следует, что повышенное содержание аренов в составе сырья приводит к увеличению

накопления кокса на поверхности катализатора и последующему снижению селективности процесса. Максимальным содержанием коксогенных структур (34 % мас.) из всех представленных образцов обладает риформат переработки сырья «та», которое содержит в своем составе 48,44 % мас. ароматических углеводородов (рис. 2).



Рис. 2. Изменение накопления кокса при использовании различных образцов сырья при эксплуатации установки
Fig. 2. Change in the coke accumulation depending on feedstock sample on the SRR unit

Одной из количественных характеристик риформата является его выход, который также напрямую зависит от компонентного состава сырья в целом. Максимальным выходом будет обладать риформат с применением сырья с повышенным содержанием нафтеновых углеводородов, так как данные компоненты быстрее всего вступают в реакции с образованием веществ с высокими значениями октановых чисел. В данном случае наибольшим из представленных выходов (90,61 % мас.) обладает риформат переработки образца сырья «ирп» с минимальным значением индекса сырья (0,40). Наименьшее количество риформата (81,32 % мас.) образуется при переработке образца «кг», индекс сырья которого 2,62, что соответствует максимальному количеству предельных углеводородов в составе, которые способствуют снижению выхода риформата и ароматических веществ.

Основной качественной характеристикой товарных бензинов, которые получают путем компаундирования составных потоков, является октановое число. Катализат, полученный путем риформирования бензиновой фракций, является одним из таких потоков, и его качество также определяет значение октанового числа. На основании проведенных исследований, можно сделать вывод, что переработка сырья с содержанием парафиновых углеводородов свыше 50 % мас. (кг) приводит к получению продукта с октановым числом по исследовательскому методу равным 93,6 пунктов. В то время как использования сырья, богатого циклическими углеводородами с относительно низким содержанием предельных (ирп), приводит к образованию риформата с октановым числом 104,3 пунктов, что позволяет судить о большей эффективности процесса.

Анализ изменения состава бензиновой фракций в процессе эксплуатации газоконденсатного месторождения

Газоконденсатное месторождение – природное скопление углеводородов, которые в условиях существующего пластового давления и температуры находятся в газовом состоянии. При понижении давления и повышении температуры имеет место явление так называемой «обратной конденсации», при которой углеводороды частично переходят из газообразной фазы в жидкую и остаются в поровых каналах пласта, из которых их трудно извлечь. Бензиновая фракция, добываемая на газоконденсатных месторождениях в течение срока эксплуатации, отличается по составу от бензиновой фракции нефтяного месторождения, так как в данном случае учитываются геологические свойства газоконденсатного коллектора [21–27].

В качестве примера исследования изменения состава сырья в процессе эксплуатации месторождения был выбран образец «та». В качестве исходных данных представлены составы сырья газоконденсатного месторождения при эксплуатации месторождения в течение трех лет (2017–2020 гг.). Наглядное изменение состава сырья в процессе эксплуатации в течение пяти лет газоконденсатного месторождения представлено на рис. 3.

Согласно рис. 3, в процессе разработки газоконденсатного месторождения состав добываемого продукта, а соответственно, и бензиновой фракций непрерывно меняется в широких пределах. Можно отметить, что при увеличении срока работы месторождения содержание парафиновых углеводородов нормального и изостроения уменьшается (2017 г. –

36,17 % мас.; 2020 г. – 19,39 % мас.). Содержание нафтеновых углеводородов, так же, как и парафиновых, при эксплуатации месторождения значительно снижается (2017 г. – 20,01 % мас.; 2020 г. – 18,68 % мас.). Содержание углеводородов ароматического ряда имеет

тенденцию к увеличению, что видно на рис. 4. В 2017 г. содержание ароматических соединений в составе бензиновой фракции составило 48,19 % мас., однако в 2020 г. содержание ароматических углеводородов уже составляет 67,83 % мас.

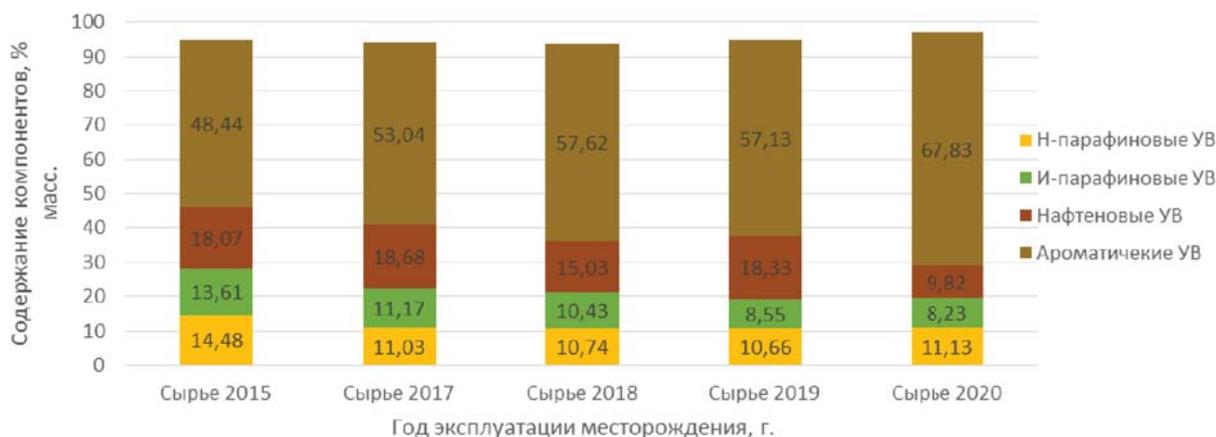


Рис. 3. Изменения состава сырья каталитического риформинга в процессе эксплуатации газоконденсатного месторождения в течение пяти лет

Fig. 3. Changes in the feedstock composition during the gas condensate field operation within five years

Мониторинг изменения состава сырья в процессе эксплуатации газоконденсатного месторождения показал, что при увеличении срока добычи газоконденсата исследуемого месторождения количество легких компонентов – парафиновых и нафтеновых углеводородов – постепенно снижается, а содержание тяжелых ароматических возрастает. Данный факт обуславливается явлением ретроградной конденсации. Ретроградная конденсация – переход природных углеводородных многокомпонентных систем из однофазного газообразного состояния в двухфазное парожидкостное состояние при изотермическом снижении давления. В процессе эксплуатации месторождения пластовое давление снижается, что негативным образом сказывается на процессе добычи пластовых флюидов, а температура остается постоянной, следовательно, газовый конденсат, в условиях пласта входящий в состав пластового газа и пребывающий в газообразном однофазном состоянии, при достижении критических условий частично переходит в жид-

кую фазу, основной частью которой являются тяжелые ароматические углеводороды, выпадающие в первую очередь [22–27]. Таким образом, при эксплуатации газоконденсатного месторождения состав бензиновой фракции обогащается тяжелыми ароматическими соединениями, которые приводят к снижению качества проведения процесса каталитического риформинга, результаты которого рассмотрены далее.

Так как состав бензиновых фракций, поступающей в качестве сырья на установку каталитического риформинга, непрерывно изменяется, необходимо оценивать степень его влияния на целевые характеристики получаемого продукта.

Данные, на основе которых была оценена динамика по изменению состава сырья, также исследовали на качественные и количественные характеристики реформата при их переработке. С применением представленной математической модели получены результаты, представленные в табл. 7.

Таблица 7. Характеристики реформата, полученные при исследовании образцов сырья

Table 7. Reformate characteristics obtained with studying feedstock samples impact

Параметр продукта/процесса Parameter of product/process	Содержание, % мас./Content, % wt.									
	2017	2017	2017	2018	2018	2018	2018	2019	2019	2020
Ароматика, % мас. Aromatics, % wt.	87,3	86,4	86,6	88,0	85,7	87,1	87,2	88,4	88,6	89,6
Октановое число (исследовательский метод) Research octane number	106,0	105,6	105,6	106,3	105,1	105,8	105,9	106,5	106,6	107,0
Выход реформата, % мас. Yield, % wt.	91,83	91,22	91,12	92,11	90,88	91,57	91,79	92,44	92,52	93,09
Кокс, % мас./Coke, % wt.	0,34	0,34	0,35	0,37	0,30	0,33	0,30	0,38	0,32	0,39

Полученные характеристики целевого продукта представлены на рис. 4, 5.

Согласно полученным данным, количественные характеристики целевого продукта при увеличении срока эксплуатации газоконденсатного месторождения увеличиваются. Выход реформата возрастает с

91,83 % мас. в 2017 г. до 93,09 % мас. в 2020 г. Однако увеличение срока эксплуатации месторождения оказывает отрицательное воздействие на каталитическую систему риформинга в связи с увеличением ароматических соединений в своем составе.

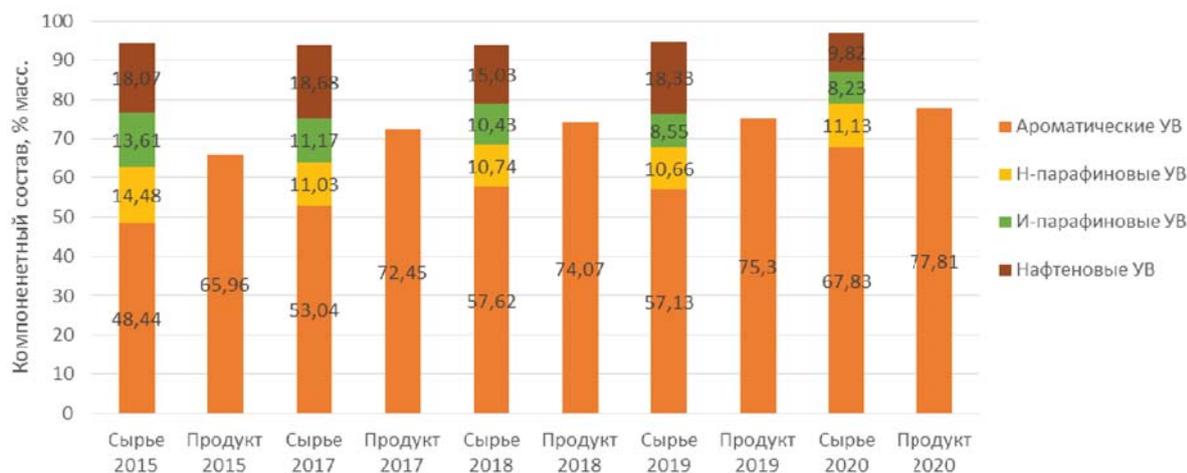


Рис. 4. Изменение содержания ароматических углеводородов в риформате при увеличении длительности эксплуатации месторождения

Fig. 4. Changes in the aromatic hydrocarbons content in the reformat with increase of the field operation duration

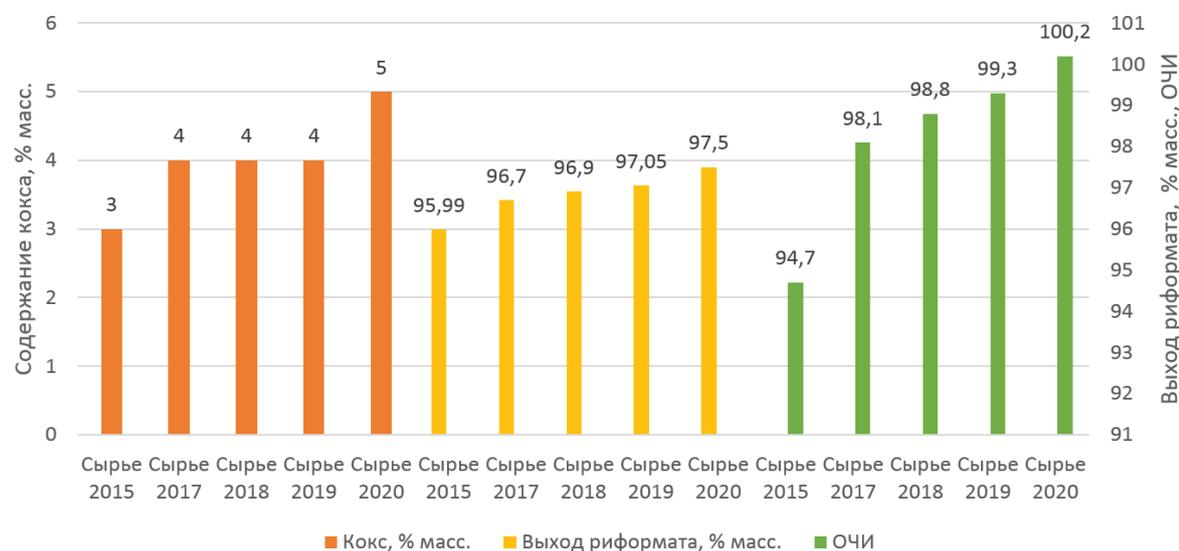


Рис. 5. Изменение характеристик продукта в зависимости от года эксплуатации месторождения

Fig. 5. Change in product characteristics depending on the year of the field operation

Как видно из рис. 3, 4, при увеличении срока эксплуатации газоконденсатного месторождения качественные характеристики целевого процесса увеличиваются. Таким образом, октановое число по исследовательскому методу бензинового топлива изменяется от 105,6 до 107,0 пунктов, что свидетельствует о производстве продукта высокого качества. Зависимость повешения ароматических соединений в составе риформата, представленная на рис. 5, также свидетельствует о повышении их количества при увеличении срока работы месторождения.

Согласно представленным изменениям состава бензиновой фракции и их влиянию на качество бензинового топлива для достижения товарного продукта высокого качества на действующем производстве необходим подбор определенного технологического режима для достижения максимально эффективного результата.

Из полученных зависимостей следует, что при увеличении срока эксплуатации месторождения характеристики полученного риформата различны. Для

обоснования данных зависимостей использовались индексы сырья одного и того же образца (табл. 6), значения которых представлены в табл. 8.

Таблица 8. Индекс сырья исследуемого образца «та»

Table 8. Feedstock index of the feedstock sample «та»

Год эксплуатации скважины Year of the field operation	Индекс сырья Feedstock index
2017	0,74
2018	0,43
2019	0,31
2020	0,28

Так, при увеличении срока работы скважины повышение содержания ароматических соединений в составе сырьевого потока отрицательным образом воздействует на работу катализатора, так как при высоких температурах данные соединения способны вступать в реакции конденсации с образованием непредельных промежуточных уплотнений.

На уровне увеличения аренов в составе добываемого сырья наблюдается уменьшение углеводородов, что приводит к снижению выхода товарного продукта и снижает количественные характеристики эффективности процесса риформинга. Однако индекс сырья, который отражает совокупность содержащихся углеводородов в сырье, уменьшается по мере эксплуатации месторождения, следовательно, выход риформата возрастает.

Низкий индекс сырья, значение которого обуславливается малым содержанием парафиновых углеводородов и максимальным уровнем ароматических и который наблюдается в 2020 г. обеспечивает наилучшим образом выход качественного продукта, так как октановое число полученного риформата достигает значения 107,0 пунктов.

Заключение

В данной работе рассмотрены основные закономерности влияния состава сырья газоконденсатных месторождений на эффективность каталитического риформинга. Исследовались три образца сырья, различных по составу и преобладанию групп парафиновых, углеводородов или ароматических углеводородов. Применение сырья с газоконденсатных месторождений с минимальным содержанием парафиновых углеводородов и высоким значением углеводородов и ароматических углеводородов приводит к увеличению выхода ароматических углеводородов по сравнению с исходным сырьем (нафтой) на 20 % мас. Повышение выхода риформата увеличилось на 3 % мас., а октановое число по исследовательскому методу увеличилось на 7–8 пунктов и составило более 100 пунктов по сравнению с исходным. При исследовании образца с преобладанием парафиновых углеводородов, наоборот, наблюдалось снижение выхода ароматических углеводородов и риформата на 5 % мас., а октанового числа – на 2 пункта. Октановое число составило 93–94 пункта при использовании данного вида сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральная служба государственной статистики – Промышленное производство в 2021 году. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/313/document/151988> (дата обращения 09.04.2022).
2. Скоробогатов В.А., Ростовцев В.Н., Паровинчак М.С. Геология и газонефтеносность юго-востока Западно-Сибирской мегапровинции. Итоги семи десятилетий исследований (1951–2020 гг.). Проблемы и перспективы // Вести газовой науки. – 2021. – № 3 (48). – С. 232–251.
3. Минерально-сырьевая база газовой отрасли промышленности России, крупных регионов и компаний: современное состояние и перспективы развития в первой половине XXI века / М.Ю. Недзвецкий, В.В. Рыбальченко, А.Н. Рыбьяков, Д.Я. Хабибуллин, В.А. Скоробогатов // Вести газовой науки. – 2021. – № 3 (48). – С. 4–20.
4. Афанасенков А.П., Высоцкий В.И., Скоробогатов В.А. Развитие минерально-сырьевой базы нефтегазового комплекса России и мира в XX–XXI вв.: итоги, проблемы, перспективы // Вести газовой науки. – 2021. – № 3 (48). – С. 21–40.
5. Кананыхина О.Г., Рыбьяков А.Н. Нефть и газ севера Западной Сибири (суша и шельф): запасы, ресурсы, структура, прогноз // Вести газовой науки. – 2021. – № 3 (48). – С. 73–79.

Вместе с тем с увеличением основных показателей риформинга увеличивается содержание кокса на катализаторе на 0,5 % мас. Ускоренное коксообразование на платиновом катализаторе крайне нежелательно, так как это приводит к его быстрой дезактивации и остановке процесса. При исследовании всех трех образцов наблюдалось увеличение кокса по сравнению с исходным сырьем. Из этого следует необходимость скорректировать технологические условия или подборе катализатора, при котором наряду с высоким выходом продукта заданного качества будет сохраняться умеренное коксообразование.

Изменение свойств и состава газового конденсата, добываемого на месторождении, оказывает прямое воздействие на эффективность всего процесса. Так, при увеличении срока эксплуатации месторождения продукт становится наиболее вязким и ароматизированным, что оказывает негативное воздействие на каталитические системы, используемые в данном процессе. Помимо этого, уменьшается содержание циклических углеводородов, что также оказывает отрицательное влияние на количественную характеристику продукта – его выход. Однако при увеличении длительности функционирования месторождения индекс сырья уменьшается, что увеличивает качественные характеристики продукта.

Получение товарного бензина при использовании сырья, состав которого изменяется во времени, – задача многокритериального анализа, так как увеличение одних параметров наилучшим образом воздействует на одни свойства и негативным образом сказывается на других. Так, путем варьирования технологических параметров с учетом анализа изменения свойств сырья можно достигнуть максимального выхода высококачественного продукта.

Исследование выполнено при поддержке Российской государственной научной фонды, проект № 19-71-10015-П. Авторы выражают признательность А.Ф. Нагорняк за подробное изучение статьи и комментарии, способствующие лучшему пониманию и аргументации выводов.

6. Rahimpour M.R., Jafari M., Iranshahi D. Progress in catalytic naphtha reforming process: a review // Applied Energy. – 2013. – V. 109. – P. 79–93.
7. Rodriguez M.F., Ancheyta J. Detailed description of kinetic and reactor modeling for naphtha catalytic reforming // Fuel. – 2011. – V. 90. – P. 3492–3508.
8. Shakor Z., Abdulrazak A.A., Sukkar K. A detailed reaction kinetic model of heavy naphtha reforming // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2020. – V. 45. – P. 7361–7370.
9. Иванчина Э.Д. Совершенствование промышленной технологии переработки углеводородного сырья с использованием платиновых катализаторов на основе нестационарной модели: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Томск, 2002. – 44 с.
10. Марчева В.С., Серебряков О.И. Геохимическая классификация газовых конденсатов // Геология, география и глобальная энергия. – 2013. – № 2 (49). – С. 47–60.
11. Unsteady-state kinetic simulation of naphtha reforming and coke combustion processes in the fixed and moving catalyst beds / A.N. Zagoruiko, A.S. Belyi, M.D. Smolnikov, A.S. Noskov // Catalysis Today. – 2014. – V. 220–227. – P. 168–177.
12. Ivanchina E.D., Ivashkina E.N., Nazarova G.U. Mathematical modelling of catalytic cracking riser reactor // Chemical Engineering Journal (Amsterdam, Netherlands). – 2017. – V. 329. – P. 262–274.

13. Mathematical modeling of the process of catalytic hydrodewaxing of atmospheric gasoil considering the interconnection of the technological scheme devices / N.S. Belinskaya, E.D. Ivanchina, E.N. Ivashkina, V.A. Chuzlov, S.A. Faleev // *Procedia Engineering*. – 2015. – V. 113. – P. 68–72.
14. Yakupova I.V., Ivanchina E.D., Sharova E.S. Mathematical modelling method application for optimisation of catalytic reforming process // *Procedia Chemistry*. – 2014. – V. 10. – P. 197–202.
15. Computer modelling system application for catalytic reforming unit work optimization / I.V. Yakupova, E.D. Ivanchina, E.S. Sharova, A.A. Syskina // *Procedia Chemistry*. – 2014. – V. 10. – P. 192–196.
16. Mathematical modeling and optimization of semi-regenerative catalytic reforming of naphtha / I.V. Pchelintseva, E.D. Ivanchina, E.S. Chernyakova, D.S. Poluboyartsev // *Oil & Gas Science and Technology – Revue IFP Energies nouvelles*. – 2021. – V. 76. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03359119/document> (дата обращения 09.04.2022).
17. Duchène P., Mencarelli L., Pagot A. Optimization approaches to the integrated system of catalytic reforming and isomerization processes in petroleum refinery // *Computers & Chemical Engineering*. – 2020. – V. 141. – P. 1–10.
18. Pasandide P., Rahmani M. Simulation and optimization of continuous catalytic reforming: Reducing energy cost and coke formation // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2021. – V. 46 (58). – P. 30005–30018.
19. ГОСТ Р 52714-2018 «Бензины автомобильные. Определение индивидуального и группового углеводородного состава методом капиллярной газовой хроматографии». – М.: Стандартинформ, 2018. – 11 с.
20. СТО Газпром 5.40-2011. Пластовый газ. Определение компонентно-фракционного состава / Утв. ОАО «Газпром» 06.09.2011; разраб ООО «Газпром-ВНИИГАЗ». – М.: Газпром Экспо, 2012. – 201 с.
21. Красовская О.К. Исследование компонентного состава нефтяного сырья и оценка его влияния на эффективность процесса каталитического риформинга бензинов методом математического моделирования // *Химия и химическая технология в XXI веке: XXII Международная конференция*. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. – С. 56–57.
22. Проблемы и возможности совершенствования исследования и моделирования газоконденсатных флюидов // А.Г. Касперович, Д.Р. Крайн, О.А. Омельченко, Н.А. Мурыхнич, Д.А. Рычков, Д.Г. Фатеев, Ю.В. Мамонтова // *Вести газовой науки*. – 2021. – № 1 (48). – С. 149–156.
23. Рыбьяков А.Н., Кананыхина О.Г. Формирование и прогнозирование конденсатсодержащих месторождений и залежей в осадочных бассейнах России. Проблемы ресурсов, разведки и добычи в XXI веке // *Вести газовой науки*. – 2021. – № 3 (48). – С. 80–91.
24. Sabea H.J., Al-Fatlawi O. Studying the impact of condensate blockage on gas production: a review // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.229> (дата обращения 09.04.2022).
25. Optimization of light hydrocarbon recovery system in condensate gas field / H.Lu, G. Ma, L. Cao, M. Azimi // *Energy Reports*. – 2019. – V. 5. – P. 1209–1221.
26. Faraji F., Ugwu J.O., Chong P.L. Modelling two-phase Z factor of gas condensate reservoirs: application of Artificial Intelligence (AI) // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – V. 206. – P. 109787.
27. Шарипов А.Ф., Волков А.Н. Система контроля и оценки качества газоконденсатных исследований скважин // *Вести газовой науки*. – 2016. – № 4 (28). – С. 173–179.

Поступила 08.06.2022 г.

Прошла рецензирование 13.09.2022 г.

Информация об авторах

Пчелинцева И.В., кандидат технических наук, ведущий специалист Исследовательского центра ООО «ГазИнформПласт».

Чернякова Е.С., кандидат технических наук, доцент отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Красовская О.К., магистрант отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кокшаров А.Г., начальник установки ООО «КИНЕФ».

UDC 665.642.44

IMPACT OF FEEDSTOCK COMPOSITION FROM GAS CONDENSATE RESERVOIRS ON CATALYTIC REFORMING

Inna V. Pchelintseva¹,
PchelincevalV@oilteam.tomsk.ru

Ekaterina S. Chernyakova²,
Sharova@tpu.ru

Olga K. Krasovskaya²,
okk3@tpu.ru

Anton G. Koksharov³,
antonk11@mail.ru

¹ Research Center GasInformPlast, LLC,
8/8, Akademicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ KINEF LLC,
1, Entuziastov highway, Kirishi, 187110, Russia.

The relevance of the research is caused by the need of catalytic reforming modernization by selecting and varying feedstock on the basis of an existing enterprise, as well as at the stage of its design.

The main aim of the research is to analyze the influence of raw materials from a gas condensate field on the qualitative and quantitative characteristics of the product.

Objects: feedstock from three gas condensate reservoirs in Western and Eastern Siberia.

Methods: determination of individual and group hydrocarbon composition by capillary gas chromatography method; mathematical modeling to study the impact of feedstock varying.

Results. A mathematical model of semi-regenerative catalytic reforming was developed. The feedstock composition impact on the reformate yield and quality was studied using the mathematical model. The feedstock used is degassed condensate from three different gas condensate fields in Western and Eastern Siberia. The degassed condensate was obtained by standard separation in the research laboratory «GasInformPlast». The paper introduces the index of raw materials, indicating the predominance of a certain hydrocarbon group in the compositions of three degassed condensates. It was revealed that use of the feedstock from gas condensate fields with a minimum content of paraffin hydrocarbons and a high value of naphthenic and aromatic hydrocarbons leads to increase in the yield of aromatic hydrocarbons by 20 % wt.; increase in reformate yield by 3 % wt.; increase in octane number by 7–8 points; increased coking by 0,5 % wt. The change in the composition of gasoline fractions during gas condensate field operation for five years is analyzed using the mathematical model. It was established that increase in the life of the deposit has negative effect on the catalytic reforming system due to the increase in aromatic compounds in its composition.

Key words:

semiregenerative catalytic reforming, feedstock composition, gas condensate reservoir, mathematic model, yield, research octane number.

The research was supported by RSCF according to the research project no. 19-71-10015-II.

The authors appreciate A.F. Nagornyak for detailed paper study and commentaries contributing to better comprehension and reasoning of conclusions.

REFERENCES

1. *Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki – promyshlennoye proizvodstvo v 2021 godu* [Dynamics of industrial production in 2021. Federal State Statistics Service]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/313/document/151988> (accessed 9 April 2022).
2. Skorobogatov V.A., Rostovtsev V.N., Parovinchak M.S. Geology and oil & gas presence towards the south-east of West-Siberian Megaprovince. Summarizing seven decades of studies (1951–2020). Challenges and outlooks. *Vesti gazovoy nauki*, 2021, vol. 3 (48), pp. 232–251. In Rus.
3. Nedzvetskiy M.Yu., Rybalchenko V.V., Rybyakov A.N., Khabibullin D.Ya., Skorobogatov V.A. Mineral resource base for gas industry, big regions and companies in Russia: contemporary status and promising trends up to a midpoint of 21st century. *Vesti gazovoy nauki*, 2021, vol. 3 (48), pp. 4–20. In Rus.
4. Afanasenkov A.P., Vysotskiy V.I., Skorobogatov V.A. Evolution of mineral resource base for petroleum industry in Russia and abroad in 20th and 21st centuries: results, challenges and outlooks. *Vesti gazovoy nauki*, 2021, vol. 3 (48), pp. 21–40. In Rus.
5. Kananykhina O.G., Rybyakov A.N. Oil and gas from north of Western Siberia (onshore and offshore): reserves, resources, structure, prediction. *Vesti gazovoy nauki*, 2021, vol. 3 (48), pp. 73–79. In Rus.
6. Rahimpour M.R., Jafari M., Iranshahi D. Progress in catalytic naphtha reforming process: a review. *Applied Energy*, 2013, vol. 109, pp. 79–93.
7. Rodríguez M.F., Ancheyta J. Detailed description of kinetic and reactor modeling for naphtha catalytic reforming. *Fuel*, 2011, vol. 90, pp. 3492–3508.
8. Shakor Z., Abdulrazak A.A., Sukkar K. a detailed reaction kinetic model of heavy naphtha reforming. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, vol. 45, pp. 7361–7370.

9. Ivanchina E.D. *Sovershenstvovanie promyshlennoy tekhnologii pererabotki uglevodorodnogo syr'ya s ispolzovaniem platinovykh katalizatorov na osnove nestacionarnoy modeli*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Improving of the industrial technology for hydrocarbon feed processing with platinum catalysts using based on the non-stationary model. Dr. Diss. Abstract]. Tomsk, 2002. 44 p.
10. Mercheva V.S., Serebryakov O. I. Geochemical classification of gas condensates. *Geologiya, geografiya i globalnaya energiya*, 2013, no. 2 (49), pp. 47–60. In Rus.
11. Zagoruiko A.N., Belyi A.S., Smolikov M.D., Noskov A.S. Unsteady-state kinetic simulation of naphtha reforming and coke combustion processes in the fixed and moving catalyst beds. *Catalysis Today*, 2014, vol. 220–227, pp. 168–177.
12. Ivanchina E.D., Ivashkina E.N., Nazarova G.U. Mathematical modelling of catalytic cracking riser reactor. *Chemical Engineering Journal (Amsterdam, Netherlands)*, 2017, vol. 329, pp. 262–274.
13. Belinskaya N.S., Ivanchina E.D., Ivashkina E.N., Chuzlov V.A., Faleev S.A. Mathematical modeling of the process of catalytic hydrodewaxing of atmospheric gasoil considering the interconnection of the technological scheme devices. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 113, pp. 68–72.
14. Yakupova I.V., Ivanchina E.D., Sharova E.S. Mathematical modelling method application for optimisation of catalytic reforming process. *Procedia Chemistry*, 2014, vol. 10, pp. 197–202.
15. Yakupova I.V., Ivanchina E.D., Sharova E.S., Syskina A.A. Computer modelling system application for catalytic reforming unit work optimization. *Procedia Chemistry*, 2014, vol. 10, pp. 192–196.
16. Pchelintseva I.V., Ivanchina E.D., Chernyakova E.S., Poluboyartsev D.S. Mathematical modeling and optimization of semi-regenerative catalytic reforming of naphtha. *Oil & Gas Science and Technology – Revue IFP Energies nouvelles*, 2021, vol. 76. Available at: <https://doi.org/10.2516/ogst/2021041> (accessed 9 April 2022).
17. Duchène P., Mencarelli L., Pagot A. Optimization approaches to the integrated system of catalytic reforming and isomerization processes in petroleum refinery. *Computers & Chemical Engineering*, 2020, vol. 141, pp. 1–10.
18. Pasandide P., Rahmani M. Simulation and optimization of continuous catalytic reforming: Reducing energy cost and coke formation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46 (58), pp. 30005–30018.
19. GOST P 52714-2018 *Benziny avtomobilnye. Opredelenie individualnogo i gruppovogo uglevodorodnogo sostava metodom kapillyarnoy gazovoy khromatografii* [State Standard 52714-2018 Motor gasolines. Determination of individual and group hydrocarbon composition by capillary gas chromatography method]. Moscow, StandardInform Publ., 2018. 11 p.
20. *STO Gazprom 5.40-2011. Plastovy gaz. Opredelenie komponentno-fraktsionnogo sostava* [Formation gas. Determination of the component-fractional composition]. Moscow, Gazprom Ekspo Publ., 2012. 201 p.
21. Krasovskaya O.K. Issledovanie komponentnogo sostava nefryanogo syr'ya i otsenka ego vliyaniya na effektivnost protsesssa kataliticheskogo riforminga benzinov metodom matematicheskogo modelirovaniya [Studying of the component composition of petroleum feed and evaluation of its influence on the efficiency of the catalytic reforming with mathematical modeling method]. *XXII Mezhdunarodnaya konferenciya. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya v XXI veke* [XXII International Conference. Chemistry and Chemical Technology in the XXI century]. Tomsk, National Research Tomsk polytechnic university Publ. house, 2021. pp. 56–57.
22. Kasperovich A.G., Krayn D.R., Omelchenko O.A., Murykhnych N.A., Rychkov D.A., Fateyev D.G., Mamontova Yu.V. Challenges and capabilities to perfect studying and modelling of gas-condensate fluids. *Vesti gazovoy nauki*, 2021, vol. 1 (48), pp. 149–156. In Rus.
23. Rybyakov A.N., Kananykhina O.G. Forming and forecasting condensate-incorporating fields and deposits in sedimentary basins of Russia. Challenges of resources, prospecting and production in 21st century. *Vesti gazovoy nauki*, 2021, vol. 3 (48), pp. 80–91. In Rus.
24. Sabea H. J., Al-Fatlawi O. Studying the impact of condensate blockage on gas production: a review. *Materials Today: Proceedings*, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.229> (accessed 9 April 2022).
25. Lu H., Ma G., Cao L., Azimi M. Optimization of light hydrocarbon recovery system in condensate gas field. *Energy Reports*, 2019, vol. 5, pp. 1209–1221.
26. Faraji F., Ugwu J.O., Chong P.L. Modelling two-phase Z factor of gas condensate reservoirs: application of Artificial Intelligence (AI). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 206, pp. 109787.
27. Sharipov A.F., Volkov A.N. Sistema kontrolya i ochenki kachestva gazokondensatnykh issledovaniy skvazhin [System for monitoring and assessing the quality of gas condensate well surveys]. *Vesti gazovoy nauki*, 2016, vol. 4 (28), pp. 173–179.

Received: 8 June 2022.

Reviewed: 13 September 2022.

Information about the authors

Inna V. Pchelintseva, Cand Sc., leading specialist, Well Testing Center «GasInformPlast».

Ekaterina S. Chernyakova, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Olga K. Krasovskaya, undergraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anton G. Koksharov, head of the installation of KINEF LLC.