

УДК 665.7

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4489

Шифр специальности ВАК: 2.00.13

Прогнозирование показателей процесса каталитического крекинга при совместной переработке вакуумного газойля и низкомаржинальных потоков нефтепереработки

Г.Ю. Назарова[✉], Е.Н. Ивашкина, Б.Д. Нафо, В.В. Мальцев, Т.А. Шафран

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]silko@tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* исследований, связанных с расширением ресурсов сырья каталитического крекинга, обусловлена как потребностью в интенсификации процесса для увеличения выхода целевых продуктов (высокооктановый бензин, легкие олефины), так и в повышении глубины переработки нефти и утилизации низкомаржинальных потоков на нефтеперерабатывающих заводах. Поэтому существует острая необходимость в создании математических инструментов для прогнозирования и оптимизации процессов каталитического крекинга при изменении режимов и качества сырья, а также планировании производства, что требует детального исследования состава вовлекаемых в переработку нефтяных фракций, термодинамических и кинетических закономерностей гетерогенного процесса. Разработка и применение математической модели процесса каталитического крекинга, учитывающей состав и свойства вовлекаемых компонентов в переработку, позволяет количественно оценить выход и качество целевых и побочных продуктов в зависимости от состава и физико-химических свойств смесового сырья и параметров технологического режима с оценкой возможности их переработки на действующем промышленном объекте.

Целью работы является экспериментальное исследование состава и свойств смесового сырья каталитического крекинга на базе вакуумного газойля, содержащего от 5 до 20 мас. % экстракта селективной очистки масел, деасфальтизата и потоков гачей дистиллятного и остаточного, и прогнозирование показателей процесса каталитического крекинга при их совместной переработке с применением математической модели. **Методы:** методы жидкостной хроматографии для исследования состава смесового сырья процесса каталитического крекинга в сочетании с рядом стандартных методов определения физико-химических свойств. **Результаты.** С применением комплекса экспериментальных исследований установлены закономерности изменения состава и физико-химических свойств компонентов и смесового сырья каталитического крекинга, содержащего от 5 до 20 мас. % гачей дистиллятного и остаточного, деасфальтизата и экстракта. Полученные результаты использованы при разработке математической модели гетерогенного каталитического процесса крекинга смесового сырья, учитывающей состав вовлекаемых в переработку нефтяных фракций и закономерности дезактивации катализатора под действием кокса. С применением математической модели установлены закономерности изменения состава и выхода продуктов процесса при вовлечении в переработку 5–20 мас. % гача дистиллятного и экстракта селективной очистки масел в смеси с вакуумным дистиллятом. Разработаны практические рекомендации по возможности расширения ресурсов углеводородного сырья процесса каталитического крекинга с учетом топливного или нефтехимического режима.

Ключевые слова: каталитический крекинг, смесовое сырье, вакуумный дистиллят, гач, деасфальтизат, экстракт, математическое моделирование

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 22-79-00238. <https://rscf.ru/project/22-79-00238/>

Для цитирования: Прогнозирование показателей процесса каталитического крекинга при совместной переработке вакуумного газойля и низкомаржинальных потоков нефтепереработки / Г.Ю. Назарова, Е.Н. Ивашкина, Б.Д. Нафо, В.В. Мальцев, Т.А. Шафран // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 172–184. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4489

UDC 665.7

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4489

Prediction of catalytic cracking performance during co-processing of vacuum gas oil and low-margin oil refining streams

G.Y. Nazarova[✉], E.N. Ivashkina, B.J. Nafu, V.V. Maltsev, T.A. Shafran

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]silko@tpu.ru

Abstract. Relevance. Expansion of catalytic cracking feedstock resources both due to the need to intensify the process to increase the yield of target products (high-octane gasoline, light olefins) and to deepen oil refining through the utilization of low-margin streams at refineries. Along with this, there is an urgent need to develop domestic mathematical tools for predicting and optimizing the catalytic cracking when the modes and feedstock qualities changes, as well as planning of production. This requires in-depth analysis and detailed study of the composition of oil fractions involved in processing and thermodynamics and kinetics of a heterogeneous process. The development and application of a mathematical model of the catalytic cracking, taking into account the composition and properties of the components involved in processing, makes it possible to quantitatively assess the yield and quality of target and by-products depending on the composition, physicochemical properties of the mixed feedstock, and the parameters of the technological regime, with an assessment of the possibility of their processing at an existing industrial facility. **Aim.** Experimental study of the composition and properties of mixed feedstock of catalytic cracking based on vacuum gas oil containing 5 to 20 wt % of extract of deasphalted oil, distillate, residual slack wax, and prediction of the catalytic cracking indicators during their co-processing using a mathematical model. **Methods.** Liquid chromatography method to study the composition of feedstock materials of the catalytic cracking in combination with a number of standard methods for determining physico-chemical properties. **Results.** Using a set of experimental studies, the authors have established the patterns of changes in the composition and physico-chemical properties of the components and mixed feedstock of catalytic cracking containing 5–20 wt % of distillate and residual slack wax, deasphalted oil, and extract. The results obtained were used in development of a mathematical model of the heterogeneous catalytic cracking of feedstock, which takes into account the composition of oil fractions involved in processing and the patterns of catalyst deactivation by coke. Using a mathematical model, the authors established the patterns of changes in the composition and yield of process products when 5–20 wt % were involved in processing distillate slack wax and extracts of selective cleaning of oils mixed with vacuum distillate. Practical recommendations were developed on the possibility of expanding the hydrocarbon feedstock of the catalytic cracking, taking into account the fuel or petrochemical regime.

Keywords: catalytic cracking, mixed feedstock, vacuum distillate, slack wax, deasphalted oil, extract, mathematical modeling

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant (project no. 22-79-00238).

For citation: Nazarova G.Yu., Ivashkina E.N., Nafu B.J., Maltsev V.V., Shafran T.A. Prediction of catalytic cracking performance during co-processing of vacuum gas oil and low-margin oil refining streams. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 172–184. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4489

Введение

Оптимизация технико-экономических показателей нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) и повышение глубины переработки нефти являются ключевыми задачами современной нефтеперерабатывающей промышленности [1]. На российских и зарубежных НПЗ применяют технологию каталитического крекинга, обеспечивающую углубление переработки нефти и производство высокооктанового компонента товарного бензина, пропанпропиленовую фракцию (ППФ) и бутанбутиленовую фракцию (ББФ) с использованием цеолитсодержащих катализаторов. Сырьем процесса являются высокомолекулярные нефтяные фрак-

ции, как вакуумные газойли, так и остаточное нефтяное сырье. Учитывая широкое введение комплексов глубокой переработки нефти на НПЗ на базе гидрокрекинга, возникает необходимость расширения сырьевой базы углеводородного сырья. По этой причине повышается интерес к переработке и оптимизации смесового сырья процесса при вовлечении в переработку низкомаржинальных потоков [1].

Для повышения глубины переработки нефтяного сырья и повышения эффективности процессов [1–3] в переработку вовлекают не только вакуумные газойли с температурой кипения 370–540 °С, но и другие нефтяные фракции, такие как: дистил-

ляты смазочных масел, атмосферные газойли, потоки с установок замедленного коксования, остатки гидрокрекинга, среднестиллятные фракции нефти, парафиновые гачи, деасфальтизированные нефтяные остатки, растительное сырье, рафинат, олефины C5–C8, петролатум и др. [4–12]. Это, с одной стороны, обеспечивает расширение ресурсов сырья каталитического крекинга и интенсификацию процесса для увеличения выхода целевых продуктов (высокооктановый бензин, легкие олефины, легкий газойль) и, с другой стороны, повышает глубину переработки нефти и утилизацию низко-маржинальных потоков на НПЗ.

Вместе с тем использование в переработке остаточного нефтяного сырья требует оптимизации температурного режима процесса или даже изменения конструктивных особенностей аппаратов, так как в составе присутствует высокое количество ароматических углеводородов и смолистых компонентов, содержащих тяжелые металлы. Это связано с тем, что конверсия сырья может ограничиваться избыточным коксообразованием и дезактивацией катализатора, в том числе термохимическими показателями процесса окисления кокса, при переработке высокоароматизированного сырья.

Сегодня технология каталитического крекинга внедрена на 15 НПЗ Российской Федерации и представлена как установками первого–третьего поколений, так и внедренными (2006–2021 гг.) и строящимися объектами (до 2023–2026 гг.). Вместе с тем при эксплуатации каждого промышленного объекта требуется непрерывная оптимизация как теплового режима работы реактора и регенератора в условиях изменения состава сырья и дезактивации катализатора, так и состава сырья, направляемого на переработку с целью обеспечения топливного или нефтехимического режимов.

Поэтому существует острая необходимость в создании математических инструментов для оптимизации процессов каталитического крекинга, прогнозирования показателей при изменении режимов и качества сырья, а также планирования производства [13], что требует детального исследования состава вовлекаемых в переработку нефтяных фракций, термодинамических и кинетических закономерностей гетерогенного процесса.

Целью работы является экспериментальное исследование состава и свойств смесового сырья каталитического крекинга на базе вакуумного газойля, содержащего от 5 до 20 % экстракта селективной очистки масел, деасфальтизата и потоков гачей дистиллятного и остаточного, и прогнозирование показателей процесса каталитического крекинга при их совместной переработке с использованием математической модели.

Задачи работы включают определение состава и физико-химических свойств потоков, являющихся потенциальным сырьем установки каталитического крекинга, и установление закономерностей изменения состава и свойств смесового сырья в зависимости от типа и количества вовлекаемых в переработку потоков, а также установление закономерностей изменения выхода и состава продуктов процесса при вовлечении на установку каталитического крекинга смесового сырья.

Методы исследования

Определение состава нефтяного сырья и его компонентов

Определение количественного группового химического состава тяжелых нефтяных фракций с температурой кипения выше 300 °С было выполнено на хроматографе «Градиент-М» методом жидкостно-адсорбционной хроматографии с градиентным вытеснением. В качестве неподвижной фазы использован силикагель АСКГ с размером частиц 63–100 мкм, подвижной фазой являлся многокомпонентный элюент в соответствии с документацией на прибор.

Определение физико-химических свойств смесового сырья и его компонентов

Для исследования физико-химических свойств компонентов сырья процесса каталитического крекинга использован ряд методов. Плотность, кинематическая и динамическая вязкость определены в соответствии с ASTM D7042-16 «Standard Test Method for Dynamic Viscosity and Density of Liquids by Stabinger Viscometer (and the Calculation of Kinematic Viscosity)». Показатель преломления определен по ГОСТ 18995.2-73 «Метод определения показателя преломления (Продукты химические жидкие)» с использованием рефрактометра Atago NAR-3T (диапазон измерения показателя преломления 1,3–1,7 nD, точность измерений $\pm 0,0001$ nD, температура 5–50 °С, точность измерений $\pm 0,2$ °С). Для определения молекулярной массы образцов смесового сырья и его компонентов использован криоскопический метод с применением лабораторного оборудования КРИОН-1 (точность температурных измерений составляет 0,001 °С, показатель точности ± 9 %) в бензоле в соответствии с ОСТ 153-39.2-048. Массовая доля серы в образцах определена в соответствии с ГОСТ 53203-2022 «Нефть и нефтепродукты. Определение серы методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии» с использованием анализатора серы «СПЕКТРОСКАН SL» (рабочий диапазон концентраций серы 0,0007–5,0 %, нижний предел обнаружения серы 0,0005 %).

Приготовление образцов смесового сырья процесса каталитического крекинга

В качестве компонентов для приготовления смесового сырья каталитического крекинга были использованы: вакуумный дистиллят, экстракты, деасфальтизаты, гачи дистиллятные и гачи остаточные. Образцы смесового сырья каталитического крекинга, содержащего 5–20 мас. % гача дистиллятного, гача остаточного, деасфальтизата и экстракта, были приготовлены в лаборатории с применением мешалки магнитного типа в условиях нагревания до 50 °С при 100 об/мин в течение 20 минут.

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментального исследования состава и свойств образцов смесового сырья процесса каталитического крекинга и его компонентов

При переработке смесового углеводородного сырья каталитического крекинга должен быть проанализирован состав и физико-химические свойства как компонентов, входящих в его состав, так и образцов приготовленных смесей. В табл. 1 приведены результаты экспериментального исследования образцов смесового сырья и его компонентов. Согласно полученным данным вакуумный дистиллят характеризуется: высоким содержанием насыщенных углеводородов – 60,6 мас. %, общее содержание ароматиче-

ских углеводородов и смолистых соединений – 33,5 и 5,9 мас. %, соответственно. Наибольшее содержание ароматических углеводородов характерно для экстракта и деасфальтизата (38,4–59,8 мас. %), при этом данные компоненты характеризуются наибольшей величиной полиароматических углеводородов и смол (33,0–18,7 и 7,4–9,2 мас. %, соответственно). Вместе с тем наиболее насыщенным компонентом сырья крекинга является гач дистиллятный, в котором содержание насыщенных углеводородов составляет 99,4 мас. %. Важно учитывать, что гач остаточный, в отличие от гача дистиллятного, характеризуется высоким содержанием ароматических углеводородов и смолистых соединений – 13,1 и 3,0 мас. %, соответственно.

Закономерности изменения состава и свойств смесового сырья при добавлении гачей, деасфальтизата и экстракта в различных соотношениях к вакуумному дистилляту

Основная проблема смешения «темных» фракций связана с нелинейным и неаддитивным характером изменения их свойств. Представление о нефти и продуктах ее переработки как о дисперсных системах во многом уточняет и позволяет прогнозировать их поведение и пути интенсификации интересующих процессов [1, 14–16].

Таблица 1. Результаты по определению состава и свойств смесового сырья каталитического крекинга и его компонентов

Table 1. Results for determining the composition and properties of mixed catalytic cracking feedstock and its components

Состав и свойства Composition and properties	НУВ	ЛАУВ	САУВ	ТАУВ	БС	СБС	S	ρ_4^{20}	ММ, г/моль MW g/mol	ν , мм ² / мм ²	n (20 °C)
	SH	LAN	MAN	HAN	BR	ABR					
мас. % /wt %											
ВД/VD	60,6	12,0	7,8	13,7	2,5	3,4	0,9655	0,9107	377,6	33,062	1,5098
ГД/SWD	99,4	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0029	0,8845	766,40	–	1,4555
ГО/RSW	83,9	8,4	1,6	3,4	1,2	1,9	0,1147	0,8913	709,70	–	1,4859
ДА/DAO	54,2	12,9	6,8	18,7	4,0	3,4	1,5011	0,9153	503,50	380,29	1,5147
Э/Е	31,1	14,5	12,3	33,0	3,8	5,4	1,5417	0,9763	378,10	118,90	1,5494
ВД+ГД (5 %)/VD+SWD (5 %)	67,4	11,4	6,0	10,7	1,5	3,1	0,953	0,903	250,94	–	1,5077
ВД+ГД (10 %)/VD+SWD (10 %)	74,2	9,4	4,6	7,9	1,4	2,5	0,910	0,8997	366,7	–	1,5047
ВД+ГД (15 %)/VD+SWD (15 %)	78,4	7,5	4,0	7,1	1,0	2,0	0,842	0,8923	155,38	–	1,5013
ВД+ГД (20 %)/VD+SWD (20 %)	80,5	6,7	3,6	6,7	0,8	1,7	0,815	0,8869	400,59	–	1,4979
ВД+ГО (5 %)/VD+RSW (5 %)	62,2	13,4	6,5	12,0	2,0	3,9	0,973	0,9066	383,21	–	1,5089
ВД+ГО (10 %)/VD+RSW (10 %)	63,2	12,8	6,3	11,2	1,8	3,9	0,898	0,9038	429,71	–	1,5069
ВД+ГО (15 %)/VD+RSW (15 %)	66,0	11,2	6,2	11,0	1,8	3,8	0,924	0,9008	352,94	–	1,5059
ВД+ГО (20 %)/VD+RSW (20 %)	67,6	10,1	5,9	10,9	1,9	3,6	0,865	0,8991	328,14	–	1,5041
ВД+ДА (5 %)/VD+DAO (5 %)	59,8	15,2	6,2	12,3	2,4	4,3	0,987	0,9097	376,47	36,257	1,5107
ВД+ДА (10 %)/VD+DAO (10 %)	58,7	14,5	5,3	14,7	2,6	4,3	1,001	0,9102	401,88	41,682	1,5109
ВД+ДА (15 %)/VD+DAO (15 %)	58,2	14,7	6,4	13,6	2,3	4,7	1,019	0,9108	315,97	43,344	1,5113
ВД+ДА (20 %)/VD+DAO (20 %)	57,2	13,7	7,3	14,6	2,5	4,8	1,031	0,9111	309,76	47,493	1,5121
ВД+Э (5 %)/VD+E (5 %)	58,0	14,2	6,7	14,4	2,7	4,0	1,022	0,9121	351,76	34,476	1,5126
ВД+Э (10 %)/VD+E (10 %)	56,8	14,3	6,9	15,1	2,8	4,1	1,047	0,9149	338,89	36,403	1,5145
ВД+Э (15 %)/VD+E (15 %)	54,9	14,3	7,3	16,1	2,8	4,6	1,074	0,9182	406,04	38,633	1,5155
ВД+Э (20 %)/VD+E (20 %)	53,6	14,3	7,6	16,8	2,7	5,0	1,101	0,9209	363,60	41,998	1,5179

НУВ – насыщенные углеводороды; ЛАУВ, САУВ, ТАУВ – легкие, средние, тяжелые ароматические углеводороды соответственно; БС, СБС – бензолные и спиртобензолные смолы соответственно; ММ – молекулярная масса; ν – кинематическая вязкость при 50 °С; S – содержание серы; n – показатель преломления; ВД – вакуумный дистиллят; ГД – гач дистиллятный; ГО – гач остаточный; ДА – деасфальтизат; Э – экстракт.

SH – saturated hydrocarbons; LAN, MAN, HAN – light, middle, heavy aromatic hydrocarbons; BR, ABR – benzene resin and alcohol-benzene resin; MW – molecular weight; ν – kinematic coefficient of viscosity at 50°C; S – sulphur content; n – refraction index; VD – vacuum distillate; SWD – slack wax distillate; RSW – residual slack wax; DAO – deasphalted oil; E – extract.

При смешивании дистиллятного гача и остаточного гача с вакуумным газойлем содержание насыщенных углеводородов в смеси увеличивается в обоих случаях, причем при добавлении гача дистиллятного более интенсивно (на 13,1 мас. %), в отличие от добавки гача остаточного (на 5,4 мас. %), который характеризуется большим количеством ароматических компонентов, согласно данным табл. 1. Количество ароматических и смолистых компонентов в общем случае снижается вследствие разбавления вакуумного газойля высоконасыщенным потоком. Снижение содержания этих групп более интенсивно при добавлении гача дистиллятного, что связано с его химическим составом и меньшим содержанием ароматических компонентов. Более того, при смешивании дистиллятного гача в соотношении от 5–20 % с вакуумным газойлем содержание ароматических и смолистых веществ резко снижается на 11,1 и 2,1 % и 5,0 и 0,4 %, соответственно, – при добавлении гача дистиллятного и остаточного, соответственно.

При смешении деасфальтизата и экстракта в соотношении 5–20 мас. % с вакуумным дистиллятом содержание насыщенных углеводородов в смеси уменьшается на 2,6 и 4,4 мас. %, соответственно, что связано с меньшим содержанием насыщенных углеводородов в потоке экстракта (31,1 мас. %). Причем при добавлении 5 мас. % экстракта полученная смесь близка по составу и свойствам к исходному вакуумному дистилляту. При добавлении 10–20 мас. % экстракта полученная смесь значительно отличается составом и физико-химическим свойствам от исходного вакуумного дистиллята. При переработке сырья, содержащего 5–20 мас. % экстракта в смеси с вакуумным дистиллятом, имеется склонность к коксообразованию из-за высокого содержания смолистых соединений (>6,7 мас. %). Общее содержание ароматических и смолистых соединений в смесевом сырье более значительно возрастает при добавлении высокоароматизированного компонента экстракта (на 3,4 и 1,0 мас. %) и отличается от исходного вакуумного дистиллята на 11,3–14,7 и 0,8–1,8 мас. %, соответственно. Увеличение содержания этих групп при добавлении 5–20 мас. % деасфальтизата составило 1,9 и 0,7 мас. %, соответственно.

Содержание легкой ароматики возрастает на 1,7–3,2 и 2,2–2,4 мас. % при добавлении деасфальтизата и экстракта к вакуумному газойлю. При этом наблюдается некоторое возрастание содержания легкой ароматики при добавлении 15 % деасфальтизата, содержание легкой ароматики при добавлении 5–20 % экстракта практически не изменяется.

При увеличении содержания гача дистиллятного и остаточного общее содержание смол в смесе-

вом сырье снижается с различной интенсивностью и возрастает при увеличении содержания деасфальтизата и экстракта в количестве 15–20 мас. %. Вовлечение такого вида сырья на установку каталитического крекинга может быть благоприятным для увеличения октанового числа бензина, при этом значительно увеличится склонность его к коксообразованию из-за высокого содержания смол (>6,7). Более того, в таких потоках важно оценить изменение содержания тяжелых металлов для предотвращения необратимой дезактивации катализатора крекинга и выбора оптимального количества добавляемого компонента.

При смешении нефтепродуктов, существенно различающихся по плотности, имеется возможность проявления эффекта «потери объема при смешении» [1, 14–19]. Изменения плотностей смесевое сырье, содержащего 5–20 мас. % гачей дистиллятных и остаточных, деасфальтизата и экстракта в вакуумном дистилляте в зависимости от содержания в смеси парафино-нафтеновых и ароматических углеводородов, приведены на рис. 1, *a–z*.

Характер установленных изменений физико-химических свойств показал, что при увеличении содержания насыщенных углеводородов в сырье, содержащем гач дистиллятный и остаточный, деасфальтизат и экстракт в смеси с вакуумным дистиллятом, плотность полученной смеси снижается, в то время как при увеличении содержания ароматических углеводородов плотность смеси увеличивается, при этом зависимость плотности смеси носит нелинейный характер. Интенсивность снижения плотности более высока при добавлении к вакуумному газойлю гача дистиллятного, при увеличении доли гача дистиллята с 5–20 % плотность полученной смеси уменьшилась с 0,903 до 0,887 г/см³ и отличалась от расчётной с учетом доли компонентов на 0,72–2,6 кг/м³.

Вязкость нефтепродуктов обусловлена взаимодействиями между единицами вязкого течения. Параметры вязкого течения зависят от строения, состава и размеров фазовых частиц, вследствие чего характер изменения вязкостных показателей отражает совокупность структурных изменений, происходящих в системе при смешении [15]. Результаты изменения кинематической вязкости смеси вакуумного дистиллята с 5–20 % мас. деасфальтизатом и экстрактом приведены на рис. 3. При увеличении содержания деасфальтизата с 5–20 мас. % в вакуумном дистилляте кинематическая вязкость при 50 °С полученной смеси возрастает с 36,257 до 47,493 мм²/с, а при увеличении содержания экстракта с 5–20 мас. % кинематическая вязкость полученной смеси возрастает с 34,476 до 41,998 мм²/с.

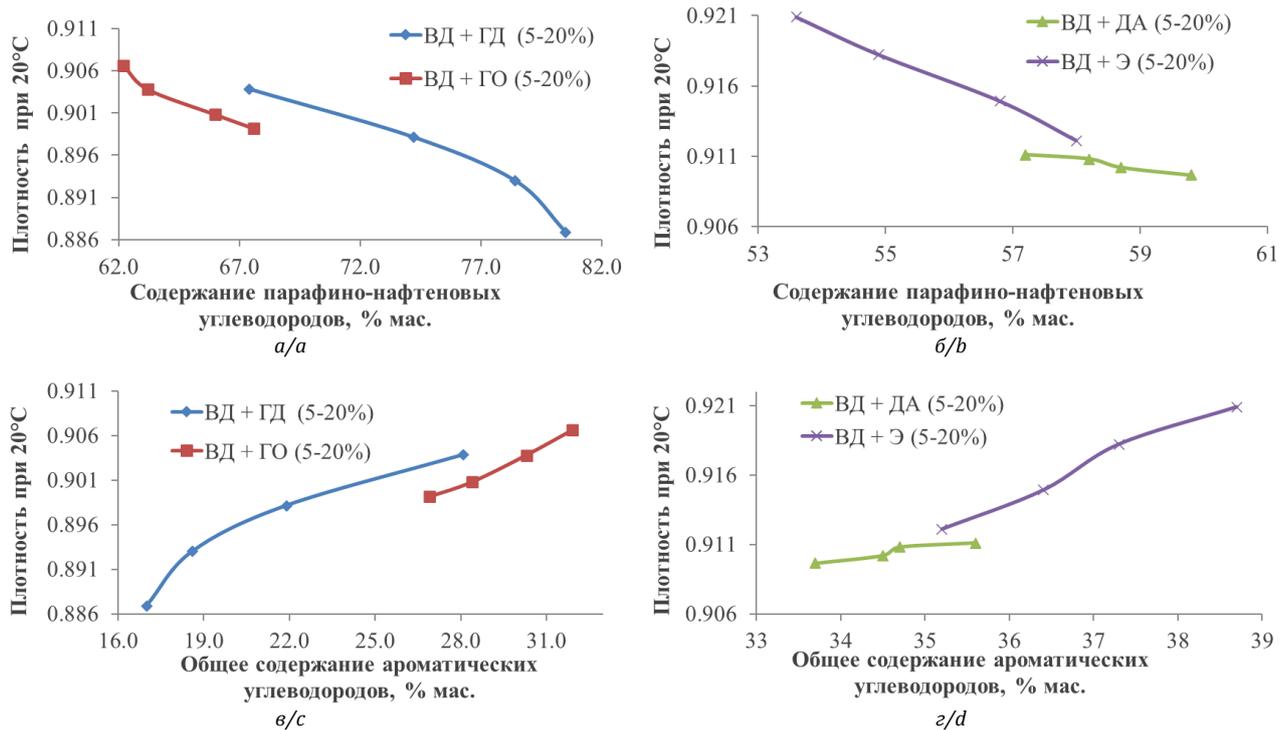


Рис. 1. Зависимости плотности смешеного сырья при добавлении гача дистиллятного и гача остаточного (а), десафальтизата и экстракта (б) к вакуумному дистилляту от содержания парафино-нафтеновых углеводородов, гача дистиллятного и гача остаточного (в), десафальтизата и экстракта (г) к вакуумному дистилляту от содержания ароматических углеводородов

Fig. 1. Dependence of mixed feedstock density when adding distillate slack wax and residual slack wax (a), desphalted oil and extract (b) to a vacuum distillate on the content of paraffin-naphthenic hydrocarbons, slack wax distillate and residual slack wax (c), desphalted oil and extract (d) to vacuum distillate on aromatic hydrocarbon content

Математическая модель процесса каталитического крекинга

На основании результатов экспериментального исследования состава сырья и продуктов процесса разработана новая реакционная схема процесса каталитического крекинга (рис. 2), отличающаяся от разработанной ранее [18] учетом химических превращений компонентов высокомолекулярных и среднестиллятных нефтяных фракций и основных классов сернистых соединений. Тем самым обеспечивается чувствительность модели к составу вовлекаемых в переработку компонентов и смешеного сырья.

Математическая модель, описанная уравнением (1), представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих изменение концентраций компонентов и температуры процесса по длине лифт-реактора с учетом изменения объема реакционной смеси и активности катализатора. Лифт-реактор моделируется как реактор идеального вытеснения, поскольку скорость газа находится в диапазоне $\sim 3,2-9,2$ м/с, что значительно превышает начальную скорость псевдоожиже-

ния, а число диффузии Пекле стремится к бесконечности:

$$\begin{cases} q \frac{dc_i}{dt} + C_i \frac{dq}{dt} = A_t \sum_{j=1}^n (\pm \psi \cdot r_j) \\ q \rho C_p \frac{dT}{dt} = A_t \sum_{j=1}^n (\pm \psi \cdot (\Delta_r H_T^0) \cdot r_j) \end{cases} \quad (1)$$

начальные условия $T_0 = T_{н.р.}$, $C_i = C_0$, где C_i – концентрации i -ой группы углеводородов, моль/м³; l – длина реактора, с; j – порядковый номер; ψ – параметр дезактивации катализатора [19, 20]; T – температура потока, К; ρ , C_p – плотность и теплоемкость потока, кг/м³, кДж/кг·К, соответственно; $(\Delta_r H_T^0)$, – тепловой эффект реакции в прямом и обратном направлениях, кДж/моль; q – объемный расход; A_t – площадь поперечного сечения реактора идеального вытеснения.

С использованием модели проведены прогнозные расчеты по влиянию состава образцов смешеного сырья, установленного в ходе проведения лабораторных испытаний. Сырье представляет собой смесь вакуумного дистиллята и добавки 5–20 мас. % гача дистиллятного и экстракта селективной очистки масел.

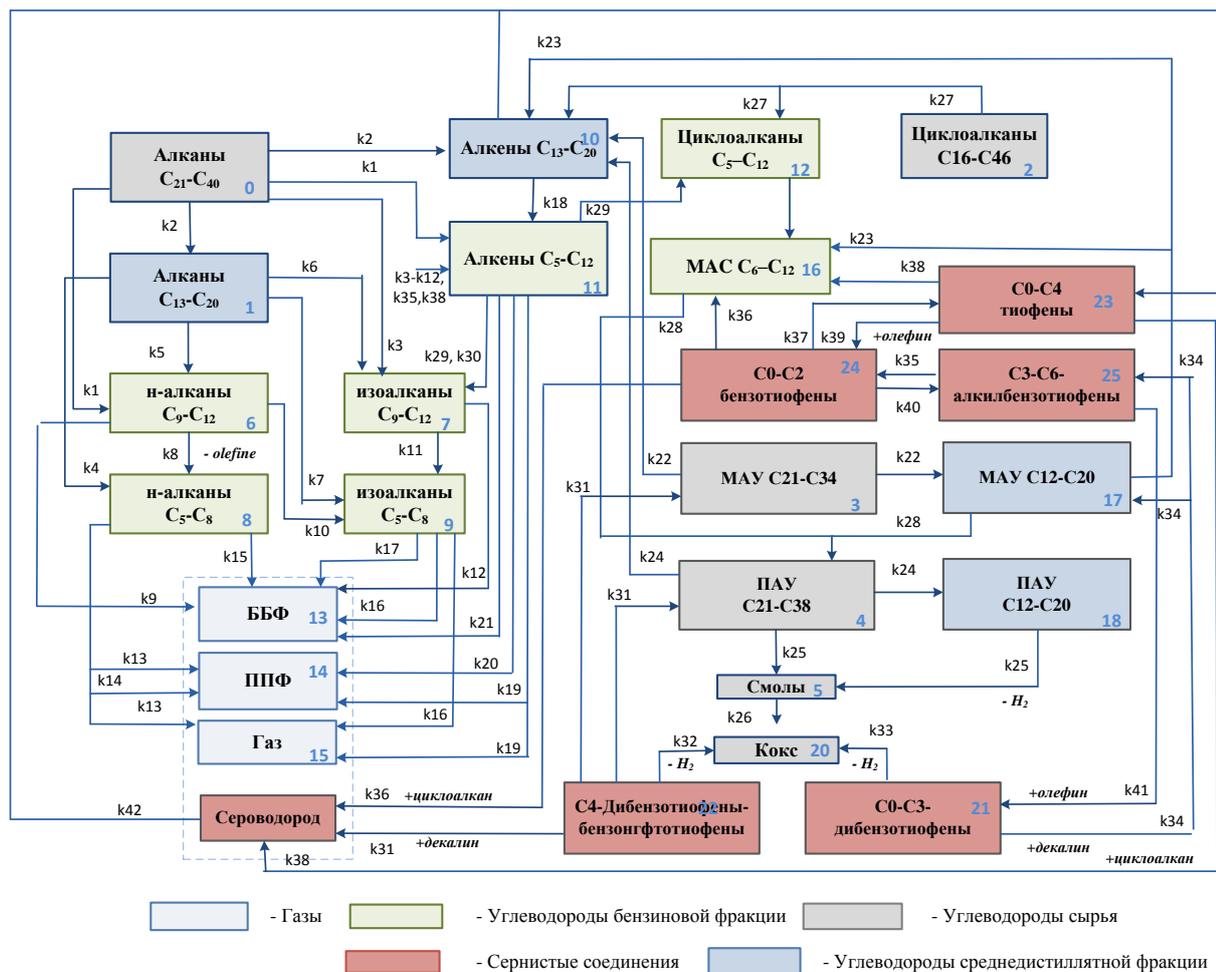


Рис. 2. Реакционная схема каталитического крекинга
 Fig. 2. Reaction scheme of catalytic cracking

Прогнозирование показателей процесса каталитического крекинга при вовлечении в переработку вакуумного дистиллята и гача дистиллятного и изменении температуры крекинга

Для проведения расчетов использованы потоки 100 мас. % вакуумного дистиллята (Сырье № 1), смеси вакуумного дистиллята и 20 мас. % дистиллятного гача (Сырье № 2) и 10 мас. % дистиллятного гача (Сырье № 3). Сырье № 1 содержит наименьшее количество насыщенных углеводородов – 60,6 мас. %, 33,5 мас. % ароматических углеводородов и 5,9 мас. % смолистых соединений. Сырье № 2 содержит наибольшее количество насыщенных углеводородов – 80,5 мас. %, ароматических углеводородов – 17 мас. % и смолистых соединений – 2,5 мас. %.

На исследуемой установке каталитического крекинга фактическая загрузка составляет 82,36 % от максимальной (5000 т/сут). Для обеспечения производительности установки по сырью выполнены прогнозные расчеты с применением математи-

ческой модели с целью определения целесообразности вовлечения и оптимального соотношения компонентов в смесевом сырье, содержащем вакуумный дистиллят и парафиновые гачи. Влияние состава смесевое сырье при вовлечении в переработку гача дистиллятного на выход целевых продуктов процесса каталитического крекинга при прочих равных условиях показано (температура крекинга 528 °С) на рис. 3 и в табл. 2.

Модельные расчеты показали, что при крекинге Сырья № 1 обеспечивается наименьший выход легких олефинов (9,77 мас. % ББФ и 4,58 мас. % ППФ) и бензина (48,2 мас. %) с высоким октановым числом по исследовательскому методу (ОЧи) – 93,7 ед. за счет соответствующего содержания аренов.

Крекинг Сырья № 2 приводит к увеличению выхода бензина до 52,55 % мас., при этом наблюдается значительное снижение ОЧи бензина (89,5 ед.) за счет снижения содержания аренов в смесевом потоке. Переработка данного сырья характеризуется наибольшим выходом легких олефинов (12,8 мас. % ББФ и 6,18 мас. % ППФ).

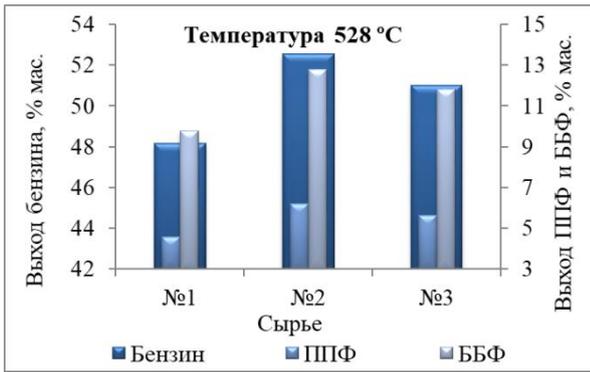


Рис. 3. Влияния состава смесового сырья на выход целевых продуктов процесса каталитического крекинга при вовлечении в переработку гача дистиллятного

Fig. 3. Influence of the mixed feedstock composition on the yield of target products of the catalytic cracking when involving slack wax distillate into processing

При крекинге Сырья № 3 выход бензина составил 51,02 мас. %, что на 1,53 мас. % ниже по сравнению с Сырьем № 2 (рис. 4, а), и это связано с уменьшением содержания насыщенных веществ в составе сырья. Хотя выход бензина снизился, Очи увеличилось на 2,27 ед. (с 89,5 до 91,7 ед.) благодаря возросшему содержанию ароматических соединений в составе Сырья № 3. Выход ББФ составил 11,8 мас. % (рис. 4, б), в переводе на т/сут это 486,2 т/сут и 5,6 мас. %, что соответствует выходу ППФ 231,3 т/сут (рис. 4, в) при постоянной температуре крекинга 528 °С. Массовые расходы продуктов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Выход продуктов с установки каталитического крекинга

Table 2. Yield of products from a catalytic cracking unit

Выход продуктов Yield of products	Сырье, т/сут/Feedstock, t/d		
	1	2	3
Бензин Gasoline	2009,85	2134,97	2100,75
ББФ/ППФ BBF/PPF	407,76/191,13	519,95/251,06	486,19/231,32

Результаты показывают, что при переработке Сырья № 3 нефтехимические режимы были достигнуты при температурах 531,5–543,7 °С, что соответствует выходам 6,45–9,85 мас. % (264,8–405,5 т/сут) по ППФ и 13,51–20,57 мас. % (566,2–846,8 т/сут) для ББФ. Таким образом, наиболее благоприятным сырьем для получения нефтехимических газов является Сырье № 2, содержащее 20 % гача дистиллятного, при этом бензиновая фракция характеризуется наименьшим октановым числом.

Максимальный выход бензинов для Сырья № 1–3 составил 49,27, 52,58, и 51,25 мас. %, соответственно, и достигается при 536,9, 530,3 и 531,5 °С, соответственно (рис. 4, а). Этот факт можно объяснить более высокими скоростями реакций вторичного крекинга с образованием газовых компонентов при каталитическом крекинге, причем переработка облегченного сырья при вовлечении гача дистиллятного способствует снижению температуры «перекрекинга» на 5–6 °С.

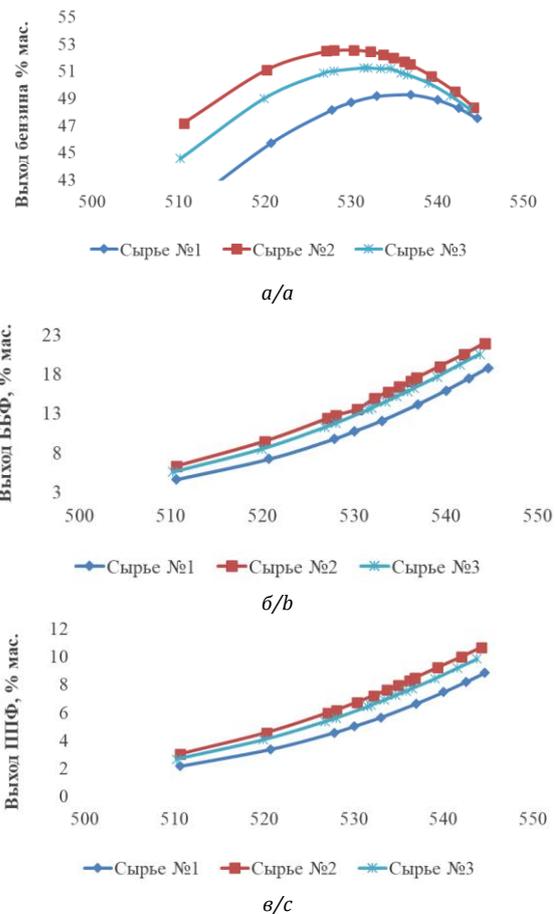


Рис. 4. Результаты влияния температуры крекинга на выход: а) бензина; б) ББФ; в) ППФ

Fig. 4. Results of cracking temperature influence on the yield of: а) gasoline; б) Butane-butylene fraction; в) Propane-propylene fraction

Прогнозирование показателей процесса каталитического крекинга при вовлечении в переработку вакуумного дистиллята и экстракта селективной очистки масел

Выполнены прогнозные расчеты (рис. 5) изменения выхода целевых продуктов при переработке вакуумного дистиллята (Сырье № 1), смесового потока, содержащего вакуумный дистиллят и экстракт в различных массовых долях 5 % (Сырье № 4), 10 % (Сырье № 5), 20 % (Сырье № 6).

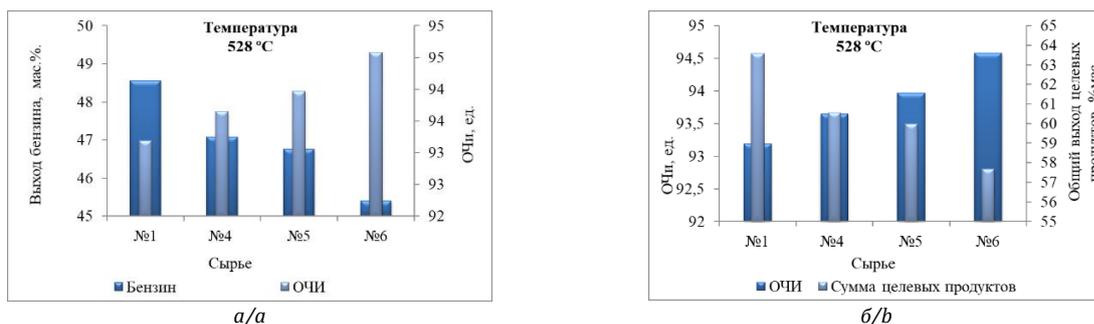


Рис. 5. Влияние количества вовлекаемого экстракта при смешении его с вакуумным дистиллятом на выход и ОЧи бензина (а), изменений в составе сырья на ОЧи бензина, общий выход бензина, ППФ и БФФ (б)

Fig. 5. Influence of the involved extract amount when mixing it with a vacuum distillate on the yield and Research octane number of gasoline (a), changes in the feedstock composition on gasoline Research octane number, overall yield of gasoline, PPF and BFF (b)

Применение модели показало, что при переработке Сырья № 1 обеспечивается производство максимального выхода бензина, ППФ и БФФ, что соответствует 48,56, 4,79 и 10,23 мас. %, соответственно (рис. 5, а, б), что связано с более высоким содержанием в нем насыщенных углеводородов, при этом ОЧи бензина ниже относительно других типов сырья (93,19 ед.), что можно объяснить наименьшим содержанием ароматических углеводородов по сравнению с Сырьем № 2, 3. По мере увеличения количества экстракта в смесевом Сырье № 4–6 наблюдается снижение выхода бензина (47,08, 46,76 и 45,41 мас. %), ППФ (4,28, 4,2 и 3,88 мас. %) и ББФ (9,18, 9,02 и 8,38 мас. %) вследствие более высокой ароматичности вовлекаемого потока. При этом с увеличением ароматических соединений возрастает ОЧи (93,6, 93,9 и 94,6 ед.), соответственно.

Вместе с тем Сырье № 2, 3 содержит значительное количество смолистых соединений (более 6 мас. %), которые обладают высокой склонностью к реакциям коксообразования и более интенсивно дезактивируют катализатор. Высокое содержание ароматических углеводородов и смолистых соединений в смесевом сырье при вовлечении экстракта в количестве от 5 до 20 мас. % приводит к увеличению содержания кокса на катализаторе на 0,1–0,2 мас. %, что потребует значительной корректировки режимов регенерации катализатора и оптимизации состава смесевых потоков, обеспечивающих получение высокооктанового бензина с высоким выходом.

В последнее время НПЗ особенно актуален вопрос о выборе оптимального соотношения компонентов при смешении низкомаржинальных потоков, поскольку компоненты смесевых потоков значительно различаются по составу. В связи с этим далее были разработаны рекомендации по расши-

рению ресурсов углеводородного сырья при использовании смесевых потоков.

Рекомендации по расширению ресурсов сырья на установке каталитического крекинга вакуумного дистиллята

Разработаны рекомендации по расширению ресурсов углеводородного сырья на установке каталитического крекинга вакуумного дистиллята в условиях дефицита традиционного вакуумного газойля, который составляет до 30 %. Предлагаются составы сырья (табл. 3), результаты модельных прогнозов (рис. 6, табл. 3) и рекомендаций вовлечения сырья с учетом топливного и нефтехимического режима процесса каталитического крекинга.

Прогнозные расчеты показали, что вовлечение 15 мас. % гача дистиллятного и 15 мас. % экстракта в переработку с вакуумным дитиллятом обеспечивает полную загрузку установки сырьем. При этом увеличение расхода бензина и олефинсодержащих газов составило 656,1 и 131,72 т/сут при температуре крекинга 528 °С.

Таблица 3. Рецептуры смесевых сырья

Table 3. Recipes of mixed feedstock

Сырье/ состав, мас. % Feedstock/ composition, wt %	% от максимальной загрузки % from maximum load			Групповой состав Group composition		
	Компонентный состав Component composition					
	ВД VD	Э E	ГД SWD	НУ SH	АУ AH	Смолы Resins
5	70	0	0	60,6	33,5	5,9
6	70	15	15	62,0	32,5	5,5
7	60	20	20	62,7	32,1	5,4
8	70	20	10	58,6	35,5	6,0

ВД – вакуумный дистиллят; Э – экстракт; ГД – гач дистиллятный; НУ – насыщенные углеводороды; АУ – ароматические углеводороды.

VD – vacuum distillate; E – extract; SWD – slack wax distillate; SH – saturated hydrocarbons; AH – aromatic hydrocarbons.

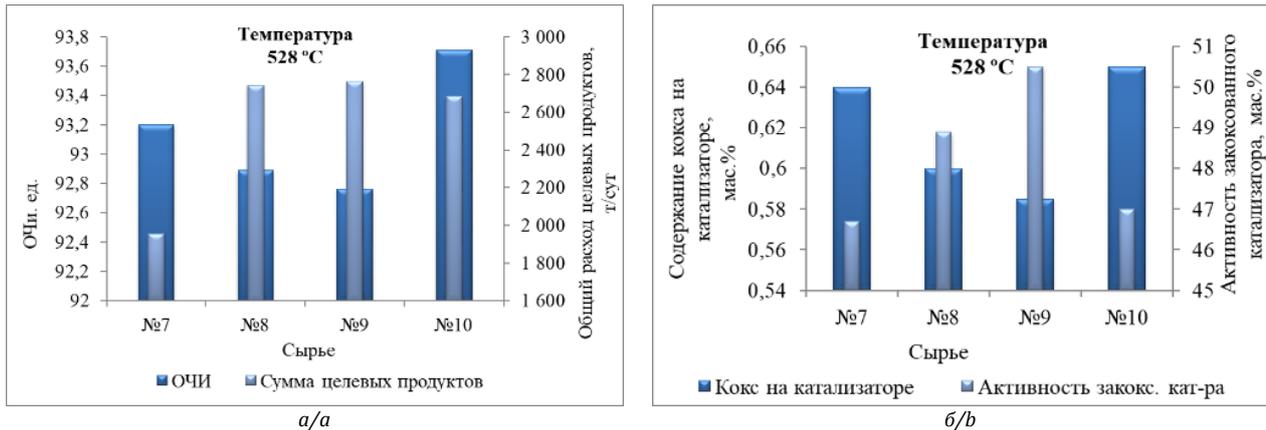


Рис. 6. Влияние изменений в составе сырья на сумму целевых продуктов и ОЧИ бензина (а) и содержание кокса и активность катализатора (б)
Fig. 6. Influence of changes in the feedstock composition on the amount of target products and gasoline RON (a) and coke content and catalyst activity (b)

Таблица 4. Результаты рекомендаций вовлечения смешанного сырья в процесс каталитического крекинга с учетом топливного и нефтехимического режима процесса
Table 4. Results on recommendation for involvement of mixed feedstock in process of FCC, taking into account the fuel and petrochemical regime of the process

Сырье Feedstock	Расход сырья, т/сут Feedstock consumption, t/day	Режим/Mode			
		Топливный/Fuel		Нефтехимический/Petrochemical	
		Температура крекинга Cracking temperature, °C	Расход бензина, т/сут Gasoline consumption, t/day	Температура крекинга Cracking temperature, °C	Расход жирного газа, т/сут Wet gas consumption, t/day
70 % ВД/VD	2866,5	528,0	1427,9	528,0	527,72
70 % ВД/VD+15 % ГД/SWD+ 15 % Э/Е	4095,0	528,0	2084,0	528,0	659,44

ВД/VD – вакуумный дистиллят/vacuum distillate; ГД/SWD – гач дистиллятный/slack wax distillate, Э/Е – экстракт/extract.

Заключение

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить составы и физико-химические свойства как отдельных компонентов смешанного сырья процесса каталитического крекинга, так и смешанного сырья, содержащего от 5 до 20 % гачей дистиллятного и остаточного, деасфальтизата и экстракта. Установлены закономерности изменения состава и свойств смешанного сырья процесса каталитического крекинга при вовлечении в переработку существенно различающихся по составу потоков. Характер изменения физико-химических свойств показал, что при содержании насыщенных углеводородов в смешанном сырье более 77 мас. % плотность изменяется нелинейно и значительно снижается.

С применением математической модели определены закономерности изменения состава и выхода продуктов процесса при вовлечении в переработку от 5 до 20 % гача дистиллятного и экстракта селективной очистки масел. Определено, что гачи являются благоприятным сырьем каталитического кре-

кинга при смешении с вакуумным газойлем, вместе с тем доля их в смешанном сырье должна определяться в зависимости от состава смешиваемых потоков и требуемого октанового числа бензина. Установлено, что при добавлении от 5 до 20 % экстракта к вакуумному газойлю выход кокса увеличивается значительно и может превышать нормы для действующего промышленного объекта, при этом октановое число бензина может достигать 94 ед.

Выполненные экспериментальные исследования и результаты расчетов по модели позволили разработать практические рекомендации по расширению ресурсов сырья процесса каталитического крекинга с учетом топливной или нефтехимической направленности процесса. Прогнозные расчеты показали, что вовлечение 15 % ГД и 15 % Э в переработку ВД обеспечивает полную загрузку установки сырьем. Увеличение расхода бензина и олефинсодержащих газов составило 668,4 т/сут (на 31,48 %) и 138,53 т/сут (на 19,97 %) при температуре крекинга 528 °C.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышева Е.А., Пискунов И.В., Капустин В.М. Повышение эффективности процесса перегонки нефти на НПЗ путем предварительного оптимального смешения сырья (обзор) // НЕФТЕХИМИЯ. – 2020. – Т. 60. – № 1. – С. 3–19.
2. Effect of modification conditions on the physicochemical characteristics of Y zeolite as a component of a petrochemical cracking catalyst / A.S. Yurtaeva, T.P. Sorokina, K.S. Plekhova, O.V. Potapenko, T.I. Gulyaeva, V.P. Talsi, V.P. Doronin // Petroleum Chemistry. – 2021. – Vol. 61. – P. 325–331. URL: <https://doi.org/10.1134/S0965544121030038> (дата обращения 15.11.2023).
3. Fakhroleslam M., Sadrameli S.M. Thermal cracking of hydrocarbons for the production of light olefins; a review on optimal process design, operation, and control // Ind. Eng. Chem. Res. – 2020. – Vol. 59. – № 27. – P. 1–55. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c00923> (дата обращения 15.11.2023).
4. Upgrading of heavy coker naphtha by means of catalytic cracking in refinery FCC unit / R. Palos, A. Gutierrez, M.L. Fernandez, D. Trueba // Fuel Processing Technology. – 2020. – Vol. 205. – № 7. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106454> (дата обращения 15.11.2023).
5. Eight-lumped kinetic model for Fischer–Tropsch wax catalytic cracking and riser reactor simulation / W. Zhao, J. Wang, K. Song, Zh. Xu, L. Zhou, H. Xiang, H. Hao, Y. Yang, Y. Li // Fuel. – 2022. – Vol. 308. – № 122028. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122028> (дата обращения 15.11.2023).
6. Fundamental study of hierarchical millisecond gas-phase catalytic cracking process for enhancing the production of light olefins from vacuum residue / Y. Che, M. Yuan, Y. Qiao, Q. Liub, J. Zhang, Y. Tian // Fuel. – 2019. – Vol. 237. – P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.088> (дата обращения 15.11.2023).
7. Additional feedstock for fluid catalytic cracking unit / R. Venugopal, V. Selvavathy, M. Lavanya, K. Balu // Petroleum Science and Technology. – 2008. – Vol. 26. – P. 436–445.
8. Amos A., Avidan A., Owen H. Innovative improvements highlight FCC's past and future // Oil Gas Journal. – 1990. – Vol. 88. – P. 33–58.
9. Residual processing in Indian FCC units: prospects and problems / M.R. Rao, D. Bhattacharya, S. Mandal, A.K. Das, S. Ghosh // Hydrocarbon Technol. – 1994. – Vol. 571. – P. 3–19.
10. Combined mild hydrocracking and fluid catalytic cracking process for efficient conversion of light cycle oil into high-quality gasoline / Peipei Miao, Xiaolin Zhu, Yangling Guo, Jie Miao, Mengyun Yu, Chunyi Li // Fuel. – 2021. – Vol. 292. – P. 120364. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120364> (дата обращения 15.11.2023).
11. Processing renewable and waste-based feedstocks with fluid catalytic cracking: impact on catalytic performance and considerations for improved catalyst design / M.C. Mastry, L. Dorazio, J.C. Fu, J.P. Gomez, S. Sedano, S.S. Ail, M.J. Castaldi, B. Yilmaz // Front. Chem. – 2023. – Vol. 11. – P. 1067488. DOI: [Frontiers | Processing renewable and waste-based feedstocks with fluid catalytic cracking: Impact on catalytic performance and considerations for improved catalyst design](https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1067488) ([frontiersin.org](https://www.frontiersin.org))
12. Studies on pretreatment of catalytic cracking slurry oil with added furfural. Petrol / F. Wang, D. Zhao, R. Song, K. Yue, R. Zhao // Sci. Technol. – 2005. – Vol. 23. – P. 1303–1312.
13. Nazarova G.Y. et al. A predictive model of catalytic cracking: Feedstock- induced changes in gasoline and gas composition // Fuel Processing Technology. – 2021. – Vol. 217. – P. 1–17.
14. Вести газовой науки / Е.Е. Городецкий, В.А. Дешабо, В.И. Косов, В.А. Курьяков, Д.И. Юдин // Сб. научн. статей ВНИИГАЗ. – 2010. – Вып. 4. – № 1. – С. 240–252.
15. Неаддитивные изменения свойств углеводородных систем при смешении / В.М. Капустин, Е.А. Чернышева, О.Ф. Глаголева, И.В. Пискунов, А.Ю. Садыров, В.И. Кувькин, А.Н. Гайнетдинова // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2017. – № 4. – С. 3–9.
16. Correlation between feedstock SARA components and FCC product yields / C. Xu, J. Gao, S. Zhao, S. Lin // Fuel. – 2005. – № 84. – P. 669–674.
17. API MPMS 12.3. Manual of petroleum measurement standards. Chapter 12. Calculation of petroleum quantities. Section 3. Volumetric shrinkage resulting from blending light hydrocarbons with crude oil. – USA: American Petroleum Institute, 1996. – 8 p.
18. Чернышева Е.А. Перераспределение соединений между фазами в процессе прямой перегонки нефтяных смесей различного состава: автореф. дис. канд. хим. наук. – М., 1989. – 226 с.
19. Расчет выхода и состава стабильного бензина и олефин содержащего газа каталитического крекинга: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664773, Российская Федерация; заявл. 03.11.2020; опубл. 18.11.2020.
20. A model of catalytic cracking: catalyst deactivation induced by feedstock and process variables / G.Y. Nazarova, E.N. Ivashkina, E.D. Ivanchina, M.Y. Mezghova // Catalysts. – 2022. – Vol. 12. – P. 98. URL: <https://doi.org/10.3390/catal12010098> (дата обращения 15.11.2023).

Информация об авторах

Галина Юрьевна Назарова, кандидат технических наук, доцент отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. silko@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0159-300X>
Елена Николаевна Ивашкина, доктор технических наук, профессор отделения химической инженерии Инженерной школой природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. ivashkinaen@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0003-3984-1352>

Баррида Джозеф Нафо, магистрант отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. nb01@tpu.ru

Владислав Вячеславович Мальцев, студент отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. vvm63@tpu.ru

Татьяна Александровна Шафран, аспирант отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. shafrantanya@mail.ru

Поступила в редакцию: 03.12.2023

Поступила после рецензирования: 13.12.2023

Принята к публикации: 21.02.2024

REFERENCES

1. Chernisheva E.A., Piskunov I.V., Kapustin V.M. Increasing the efficiency of the oil distillation process at refineries by preliminary optimal mixing of raw materials (review). *NEFTEHIMIYA*, 2020, vol. 60, no. 1, pp. 3–19. (In Russ.)
2. Yurtaeva A.S., Sorokina T.P., Plekhova K.S., Potapenko O.V., Gulyaeva T.I., Talsi V.P., Doronin V.P. Effect of modification conditions on the physicochemical characteristics of Y zeolite as a component of a petrochemical cracking catalyst. *Petroleum Chemistry*, 2021, vol. 61, pp. 325–331. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0965544121030038> (accessed 15 November 2023).
3. Fakhroleslam M., Sadrameli S.M. Thermal cracking of hydrocarbons for the production of light olefins; a review on optimal process design, operation, and control. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2020, vol. 59, no. 27, pp. 1–55. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c00923> (accessed 15 November 2023).
4. Palos R., Gutierrez A., Fernandez M.L., Trueba D. Upgrading of heavy coker naphtha by means of catalytic cracking in refinery FCC unit. *Fuel Processing Technology*, 2020, vol. 205, no. 7. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106454> (accessed 15 November 2023).
5. Zhao W., Wang J., Song K., Xu Zh., Zhou L., Xiang H., Hao H., Yang Y., Li Y. Eight-lumped kinetic model for Fischer-Tropsch wax catalytic cracking and riser reactor simulation. *Fuel*, 2022, vol. 308, no. 122028. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122028> (accessed 15 November 2023).
6. Che Y., Yuan M., Qiao Y., Liub Q., Zhang J., Tian Y. Fundamental study of hierarchical millisecond gas-phase catalytic cracking process for enhancing the production of light olefins from vacuum residue. *Fuel*, 2019, vol. 237, pp. 1–9. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.088> (accessed 15 November 2023).
7. Venugopal R., Selvavathy V., Lavanya M., Balu K. Additional feedstock for fluid catalytic cracking unit. *Petroleum Science and Technology*, 2008, vol. 26, pp. 436–445.
8. Amos A., Avidan A., Owen H. Innovative improvements highlight FCC's past and future. *Oil Gas Journal*, 1990, vol. 88, pp. 33–58.
9. Rao M.R., Bhattacharya D., Mandal S., Das A.K., Ghosh S. Residual processing in Indian FCC units: Prospects and problems. *Hydrocarbon Technol.*, 1994, vol. 571, pp. 3–19.
10. Peipei Miao, Xiaolin Zhu, Yangling Guo, Jie Miao, Mengyun Yu, Chunyi Li. Combined mild hydrocracking and fluid catalytic cracking process for efficient conversion of light cycle oil into high-quality gasoline. *Fuel*, 2021, vol. 292, pp. 120364. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120364> (accessed 15 November 2023).
11. Mastry M.C., Dorazio L., Fu J.C., Gomez J.P., Sedano S., Ail S.S., Castaldi M.J., Yilmaz B. Processing renewable and waste-based feedstocks with fluid catalytic cracking: impact on catalytic performance and considerations for improved catalyst design. *Front. Chem.*, 2023, vol. 11, P. 1067488. DOI: Frontiers | Processing renewable and waste-based feedstocks with fluid catalytic cracking: Impact on catalytic performance and considerations for improved catalyst design (frontiersin.org)
12. Wang F., Zhao D., Song R., Yue K., Zhao R. Studies on pretreatment of catalytic cracking slurry oil with added furfural. *Petrol. Sci. Technol.*, 2005, vol. 23, pp. 1303–1312.
13. Nazarova G.Y. A predictive model of catalytic cracking: Feedstock- induced changes in gasoline and gas composition. *Fuel Processing Technology*, 2021, vol. 217, pp. 1–17.
14. Gorodeckij E.E., Dshabo V.A., Kosov V.I., Kuryakov V.A., Yudin D.I. News of gas science. *Sb. nauchnykh statey VNIIGAZ*, 2010, Iss. 4, no. 1, pp. 240–252. (In Russ.)
15. Kapustin V.M., Chernysheva E.A., Glagoleva O.F., Piskunov I.V., Sadyrov A.Y., Kuvykin V.I., Gaynetdinova A.N. Non-additive changes in the properties of hydrocarbon systems during mixing. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tehnicheskie dostizheniya i peredovoy opyt*, 2017, no. 4, pp. 3–9. (In Russ.)
16. Xu C., Gao J., Zhao S., Lin S. Correlation between feedstock SARA components and FCC product yields. *Fuel*, 2005, no. 84, pp. 669–674.
17. API MPMS 12.3. *Manual of petroleum measurement standards. Chapter 12. Calculation of petroleum quantities. Section 3. Volumetric shrinkage resulting from blending light hydrocarbons with crude oil.* USA, American Petroleum Institute, 1996. 8 p.
18. Chernysheva E.A. *Redistribution of compounds between phases during direct distillation of petroleum mixtures of various compositions.* Cand. Diss. Abstract. Moscow, 1989. 226 p. (In Russ.)
19. Nazarova G.Y., Ivashkina E.N., Oreshina A.A. Calculation of the output and composition of stable gasoline and olefin-containing gas from catalytic cracking. *The state registration certificate of a computer program RF*, no. 2020664773, 2020. (In Russ.)
20. Nazarova G.Y., Ivashkina E.N., Evanchina E.D., Mezhova M.Y. A model of catalytic cracking: catalyst deactivation induced by feedstock and process variables. *Catalysts*, 2022, vol. 12, pp. 98. Available at: <https://doi.org/10.3390/catal12010098> (accessed 15 November 2023).

Information about the authors

Galina Yu. Nazarova, Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. silko@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0159-300X>

Elena N. Ivashkina, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. ivashkinaen@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0003-3984-1352>

Barida J. Nafu, Master's Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. nb01@tpu.ru

Vladislav V. Maltsev, Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. vvm63@tpu.ru

Tatyana A. Shafran, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. shafrantanya@mail.ru

Received: 03.12.2023

Revised: 13.12.2023

Accepted: 21.02.2024