

А. В. Долгих (асп.), Н. Д. Кифель (магистрант),
В. Г. Рябов (д.т.н., проф.), А. Н. Чудинов (к.х.н., доц.)

АНАЛИЗ ПРОДУКТОВ ДЕАСФАЛЬТИЗАЦИИ ГУДРОНА *n*-ПЕНТАНОМ И БЕНЗИНОВЫМИ ФРАКЦИЯМИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ В ПРОЦЕССЕ КАТАЛИТИЧЕСКОГО КРЕКИНГА

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
кафедра «Химические технологии»
614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29; e-mail: dolgiha96@gmail.com

A. V. Dolgikh, N. D. Kifel, V. G. Ryabov, A. N. Chudinov

APPLICABILITY OF THE *n*-PENTANE/NAPHTA DEASPHALTED OIL AS A FEED FOR THE FLUID CATALYTIC CRACKING UNIT

Perm National Research Polytechnic University
29, Komsomolskiy Prospekt Str., 614990, Perm, Russia; e-mail: dolgiha96@gmail.com

Рассмотрена возможность вовлечения продуктов деасфальтизации в процесс каталитического крекинга (FCC). Поскольку требования к сырью FCC менее жесткие, чем к масляным компонентам предполагается в процессе деасфальтизации заменить пропан на более тяжелые растворители (*n*-пентан, фракция н.к.–80 °С, изомеризат). В этом случае можно будет увеличить выход деасфальтизата, качество которого уже не будет соответствовать требованиям, предъявляемым к остаточным компонентам масел. Однако такой продукт все еще будет пригодным для каталитической переработки с получением светлых фракций. Чтобы оценить возможность получения сырьевых компонентов крекинга, выполнен процесс деасфальтизации гудрона с использованием в качестве растворителей *n*-пентана, прямогонной фракцией н.к.–80 °С и продукта изомеризации, исследованы физико-химические свойства и состав полученных продуктов. По результатам анализа деасфальтизатов установлено, что возможно получение сырья каталитического крекинга, требующего дополнительной переработки (сырье III группы), в то же время использование смеси с полученными добавление таких продуктов (до 30% мас.) к вакуумному газойлю позволяет получать сырье, не требующее предварительной подготовки (сырье I и II группы).

Ключевые слова: гудрон; деасфальтизат; деасфальтизация; изомеризат; каталитический крекинг FCC; *n*-пентан; прямогонная бензиновая фракция; растворители; экстракция.

In this paper deasphalted oil (DAO) is obtained and analyzed in order to be involved as a feedstock for the fluidized catalytic cracking (FCC) process. Since the quality requirements for FCC feed are less stringent, than for the lube base stock, it is proposed to use as a deasphalting solvent heavier than propane hydrocarbons: *n*-pentane, light straight run naphtha (IBP–80 °C), and isomerate. Such solvent replacement leads to the increase of the deasphalted oil yield. In this case obtained DAO is not match to the lube base requirements, but still can be used as the FCC feed. Vacuum residue underwent deasphalting process with *n*-pentane/light straight run naphtha/isomerate to assess the applicability of the obtained DAOs as the FCC feedstock. DAOs analyses results have shown, that such products can be attributed to the III group feedstock, which requires some pretreatment procedures before FCC processing. On the other hand, addition of the such DAO up to 30% wt. to the vacuum gasoil (common FCC feed) gives I or II group feedstock, which can be processed in the FCC unit without any pretreatment.

Key words: deasphalted oil; deasphalting; extraction; Fluid catalytic cracking; isomerate; *n*-pentane; naphtha; solvents; vacuum tower bottoms.

Дата поступления 21.09.23

Таблица 1

Классификация остаточного сырья каталитического крекинга

Показатель	Тип сырья			
	I	II	III	IV
Плотность при 20 °С, кг/м ³	<930	930–970	>970	–
Содержание металлов (V и Ni), г/т	<10	10–30	30–150	>150
Коксуемость по Конрадсону, % мас.	<5	5–10	10–20	>20
Содержание серы, % мас.	0.2–1.5	1.5–3.0	3.0–4.1	–

Углубление переработки нефти является важнейшим направлением в развитии всех нефтеперерабатывающих производств, так как превращение остаточных продуктов в более легкие углеводороды повышает конкурентоспособность предприятия. Самым тяжелым продуктом, получаемым прямой перегонкой нефти является, гудрон, использование которого, как правило, ограничивается установками замедленного коксования и деасфальтизации пропаном с получением компонентов остаточных масел, однако их выход в расчете на исходный гудрон не превышает 35% мас.¹

Анализ запасов пространственного распределения тяжелых нефтей в мире показал, что их наибольшее количество располагается в Канаде, Венесуэле и России². Согласно официальной информации крупнейших российских компаний (Роснефть и Лукойл), в последнее время наблюдается рост добычи такой нефти в России^{3, 4}, поэтому переработка тяжелых нефтей становится актуальным направлением развития этих компаний в будущем.

Процесс деасфальтизации известен достаточно давно, и одним из первых достижений является разработка процесса двухступенчатой деасфальтизации нефтяных в 1964 г.⁵. С тех пор данный процесс постоянно совершенствуется и в направлении изменения условий процесса, качества сырья и типа растворителя, однако большинство усилий направлено на вовлечение деасфальтизата в производство масел⁶. Альтернативным вариантом является использование этого продукта в качестве сырья каталитического крекинга в псевдоожиженном слое (FCC)⁷.

Процесс FCC позволяет получать из тяжелых продуктов дополнительное количество светлых фракций и углеводородных газов. Помимо этого, в настоящее время проводятся исследования по совместной переработке пластиков^{8, 9} и пиролизного масла от шин вместе с вакуумным газойлем¹⁰. Актуальность таких работ заключается в улучшении экологической ситуации, так как частично решается проблема утилизации и накопления производственных отходов¹¹.

Следует отметить, что в настоящее время не каждый продукт соответствует требованиям к качеству сырья процесса FCC (табл. 1¹⁰).

Из литературы известен ряд способов получения деасфальтизата с применением в качестве растворителей более тяжелых, чем пропан, углеводородов, таких как бутан, пентан, гексан, гептан, бензиновые фракции, их смеси, полярные растворители и др.^{12–14}, однако несмотря на высокий выход получаемых продуктов, их применение в качестве компонентов масел не всегда допустимо по причине несоответствия показателей качества имеющимся требованиям.

Целью настоящей работы является изучение свойств продуктов деасфальтизации гудрона с применением в качестве растворителей *n*-пентана и легких бензиновых фракций нефтеперерабатывающего завода ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез», а также оценка возможности использования полученных в данном процессе продуктов в качестве компонентов сырья каталитического крекинга.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовался гудрон с нефтеперерабатывающего предприятия ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез». Данный продукт получен из смеси Западно-сибирской и Каменноложской нефти. В процессе деасфальтизации экстрагирующими компонентами являлись *n*-пентан и технологические потоки завода: изомеризат и прямогонная бензиновая фракция от начала кипения до 80 °С (нк–80 °С).

Целевой продукт – деасфальтизат в последующих экспериментах был получен в лаборатории по экспериментальной методике при 50 °С в реакторе с мешалкой, подробный способ ведения процесса описан в нашей работе¹⁵.

Гудрон является самым вязким и сильно загрязненным гетероатомными и асфальтено-смолистыми соединениями, а также наиболее высококипящим продуктом (табл. 2), получаемым на установках атмосферно-вакуумной трубчатки (АВТ). Поэтому в чистом виде в качестве сырья FCC он использоваться не может.

По показателям плотности, коксуемости и содержанию металлов гудрон с ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» относится к III типу сырья каталитического крекинга, что говорит о его низкой пригодности при переработке в процессе FCC.

Краткая характеристика растворителей процесса деасфальтизации следующая:

- *n*-пентан марки ч.д.а.;
- изомеризат (изопентан-изогексановая фракция установки изомеризации);
- фракция нк–80 °С (прямогонная бензиновая с блока вторичной ректификации установок АВТ-4,5).

Компонентный состав изомеризата и фракции нк–80 °С был определен на газовом хромато-

Физико-химические характеристики гудрона

Продукт	Плотность, кг/м ³	Динамическая вязкость при 40 °С, Па·с	Коксуемость, % мас.	Зольность, % мас.	Содержание азота, ppm	Содержание серы, % мас.	Содержание Ni и V, г/т
Гудрон с АВТ-1,2	981.2	28.6	13.1	0.11	2649	2.58	80

графе методом имитированной дистилляции SimDis (табл. 3). Плотность сырья и продуктов определяли пикнометрическим методом в соответствии с ГОСТ 3900-87.

Таблица 3

Состав используемых растворителей

Углеводород	Фракция нк-80, % мас.	Изомеризат, % мас.
C ₄	7.0	0.3
C ₅	52.6	35.4
C ₆	40.0	54.0
Метилциклопентан	4.5	3.4
Циклогексан	0.8	5.0
Бензол	1.9	0.0
C ₇₊	0.3	2.0

Динамическую вязкость измеряли с помощью модульного компактного реометра Anton Paar MCR 102 с использованием геометрии пластины-пластина с диаметром 25 мм при скорости вращения 10 об/мин. Значения показателя оценивали при температурах 40, 80 и 100 °С.

Коксуемость по Конрадсону выполняли в соответствии с методом ASTM D 4530-07 на микроанализаторе NMC440 (Normalab).

Содержание серы в нефтепродуктах диагностировали с помощью портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра ElvaX по ГОСТ ISO 8754-2013. А содержание азоторганических соединений в гудроне и деасфальтизатах определяли на элементном анализаторе Analytik Jena Multi EA 5000 в соответствии со стандартом ASTM D 5762-08.

Массовое определение ванадия и никеля было проведено энергодисперсным флуоресцентным спектрометром EDX-8100P «Shimadzu».

Групповой состав деасфальтизатов был сделан с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии, которую выполняли на хроматографе Prostar 210 фирмы «Varian» с использованием колонки Varian Microsorb 100-5 Amino 250×4.6 мм (силикагель с привитыми аминопропильными группами), расход элюента – *n*-гексана – 1.0 мл/мин. Концентрация раствора анализируемого вещества в *n*-гексане порядка 0.1% мас.

Результаты и их обсуждение

Деасфальтизация – это процесс избирательного поглощения растворителем легких продуктов, содержащихся в гудроне. Поэтому при малой кратности растворителя к сырью происходит

только небольшое растворение последнего, а по мере увеличения кратности выход деасфальтизата снижается, а его качество улучшается. Дальнейшее увеличение количества растворителя приводит к тому, что часть тяжелых продуктов – в первую очередь смол, оседающих вместе с асфальтенами, переходит в деасфальтизатную часть¹⁶.

В связи с этим первой задачей исследования было выявить зависимость эффективности деасфальтизации от количества растворителя по изменению свойств, полученных деасфальтизатов, а затем определить оптимальное соотношение растворитель/сырье.

По результатам серии экспериментов, при которых объемное соотношение *n*-пентан:гудрон варьировалось от 3:1 до 25:1, установлено, что плотность деасфальтизата снижается с увеличением количества растворителя (рис. 1).

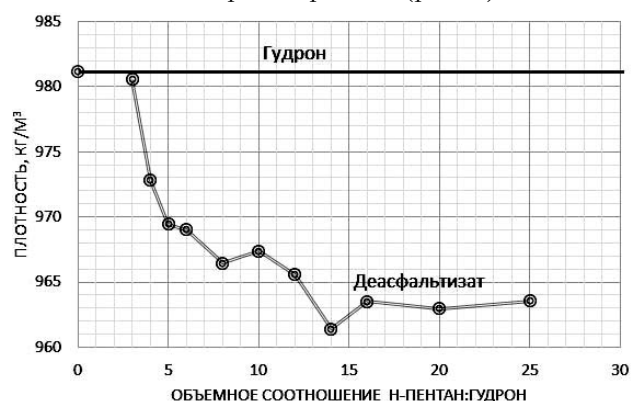


Рис. 1. Изменение плотности деасфальтизата в зависимости от кратности проведения процесса

При объемной кратности *n*-пентан:гудрон, равной 14:1, раствор достигает насыщения, и дальнейшее увеличение количества *n*-пентана приводит к растворению некоторой доли смол в деасфальтизатной фазе. Последнее можно наблюдать по увеличению плотности целевого продукта (рис. 1).

Аналогичный характер носят зависимости коксуемости и вязкости деасфальтизата от объемной кратности растворителя (рис. 2, 3). Исследование вязкостных свойств необходимо для того, чтобы понимать, как на существующем оборудовании каталитического крекинга может измениться гидравлическое сопротивление, возникающее в трубопроводах, реакторе и регенераторе, поскольку реологические свойства оказывают воздействие

на кинетику каталитического крекинга, а также на восстановление катализатора в регенераторе^{17, 18}.

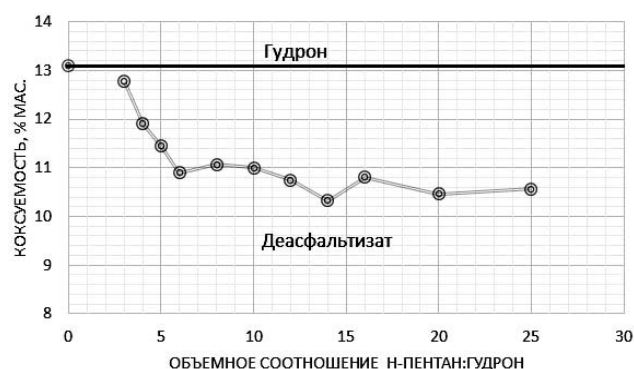


Рис. 2. Изменение коксуемости деасфальтизата в зависимости от кратности растворитель:гудрон

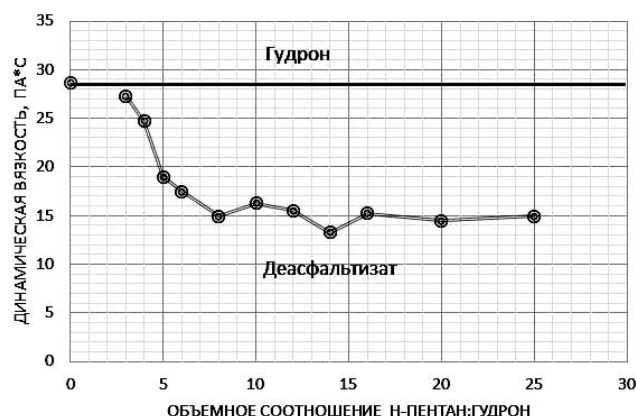


Рис. 3. Изменение вязкости деасфальтизата при 40 °С в зависимости от кратности растворитель:гудрон

Изменение коксуемости деасфальтизата также является ключевым параметром в определении типа сырья крекинга. Этот показатель косвенно указывает на выход продуктов крекинга и на количество гетероатомных соединений в сырье. Чем выше коксуемость, тем содержание последних больше^{5, 12}. Наименьшее значение коксуемости (10,3 % мас.) было достигнуто при кратности *n*-пентан:гудрон, равной 14:1 (рис. 2). По этому показателю деасфальтизат практически соответствует II типу сырья крекинга – коксуемость в пределах 5–10 % мас. (табл. 1).

На основании полученных данных оптимальным диапазоном кратности растворитель:сырье для дальнейших экспериментов принимается (12–16):1. Именно при этих соотношениях система находится максимально близко к зоне насыщения в текущих условиях проведения процесса деасфальтизации в реакторе.

Помимо коксуемости важным параметром сырья FCC является содержание металлов (V и Ni), которые необратимо отравляют катализатор крекинга и вызывают разрушение цеолита¹⁹. Зольность исходного гудрона и продуктов деасфальтизации показывает суммарное содержание

металлов. Установлено, что в процессе деасфальтизации показатель зольности снижается примерно вдвое (рис. 4).

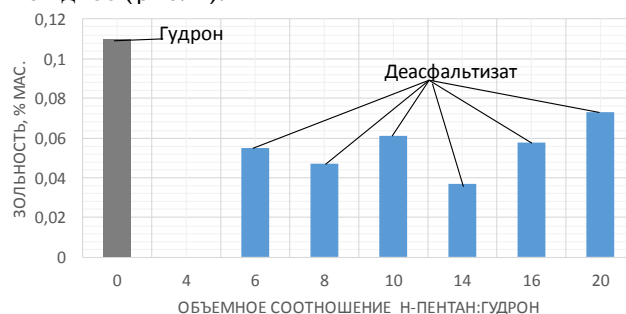


Рис. 4. Изменение показателя зольности в деасфальтизатах по сравнению с гудроном

По результатам рентгенофлуоресцентного анализа деасфальтизата при кратности растворитель:сырье 16:1 можно предположить, что основная часть ванадия и никеля концентрируется в асфальтовой фракции.

Далее в табл. 4 для сравнения приведены анализы: сырья, продуктов деасфальтизации и вакуумного газойля (типичного сырья каталитического крекинга), который относится к I группе сырья каталитического крекинга по содержанию металлов (менее 10 г/т).

Таблица 4

Содержание металлов

Продукт	Сод-е Ni, г/т	Сод-е V, г/т
Асфальт (пентан:гудрон = 16:1)	150	260
Гудрон	30	50
Деасфальтизат (пентан:гудрон = 16:1)	20	30
Вакуумный газойль	<<10	<<10

Важной характеристикой сырья каталитического крекинга является содержание гетеросоединений, которые отравляют катализатор и снижают его активность. Однако эти вещества частично выжигаются при регенерации катализатора, и их негативное влияние на активность не так заметно в сравнении тяжелыми металлами²⁰. Тем не менее, для их полного удаления и восстановления активности катализатора требуется увеличивать температуру и длительность процесса регенерации. Повышается образование коррозионно-активных веществ, таких как сернистый газ, аммиак, цианиды. Все перечисленные компоненты снижают срок службы катализатора и могут привести к его преждевременной замене²¹.

Гетероатомные сернистые и азотистые соединения наиболее часто распределены в более тяжелых фракциях нефти, поэтому логично предположить меньшее содержание этих веществ в деасфальтизате в сравнении с исходным гудроном и асфальтом⁶. Однако по результатам полученных

экспериментов видно, что доля сернистых гетероатомных компонентов сначала увеличивается относительно гудрона, а затем практически не изменяется, в то время как концентрация азотистых снижается на 22% мас. относительно сырья (рис. 5).

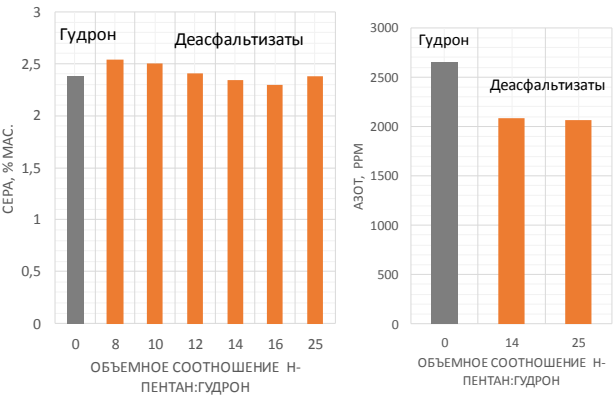


Рис. 5. Изменение содержания гетероатомных соединений азота и серы в продуктах деасфальтизации

В табл. 5 представлено сравнение физико-химических свойств типичного сырья крекинга - вакуумного газойля, а также деасфальтизата, полученного при объемном соотношении *n*-пентан:-гудрон, равным 16:1.

Как видно из таблицы, деасфальтизат ввиду высокого содержания металлов и повышенных вязкостных свойств не рекомендуется использовать в чистом виде как единственное сырье каталитического крекинга, однако смешение деасфальтизата до 36.5% мас. с вакуумным газойлем позволяет получить сырье крекинга, которое относится к I типу сырья по показателям плотности, коксуемости и ко II по содержанию металлов и серы.

Второй задачей исследования являлось определение возможности применения получаемых на предприятии легких бензиновых продуктов в качестве растворителей для процесса деасфальтизации. С этой целью выбраны два растворителя: изо-

меризат и прямогонная фракция нк-80 °С кампании ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез».

Степень оптимального насыщения раствора в процессе деасфальтизации оценивалась по минимальному выходу целевого продукта – деасфальтизата. Массовый выход деасфальтизата и асфальта при различном соотношении растворитель:сырье представлен в табл. 6.

Параметры процесса деасфальтизации были аналогичны условиям деасфальтизации *n*-пентаном: температура 50 °С, избыточное давление 1.1 кгс/см². Наибольший выход асфальтенов наблюдался при следующих соотношениях растворителя к сырью:

- 4:1 – при деасфальтизации фракцией нк-80 °С;
- 5:1 – при деасфальтизации изомеризатом.

Коксуемость деасфальтизата, полученного при использовании изомеризата, составляла 11.5% мас., а на бензиновой фракции нк-80 °С – 11.1% мас. Данные показатели несколько хуже, чем на пентане (10.3% мас.), однако в смеси с вакуумным газойлем также возможно получение сырья каталитического крекинга I и II типа.

Для сравнения качества процесса деасфальтизации был исследован групповой состав полученных деасфальтизатов, обладающих наилучшими показателями, а также приведены данные вакуумного газойля и деасфальтизата, полученного пропановой деасфальтизацией гудрона (табл. 7). Анализ результатов показывает, что при увеличении молекулярной массы растворителя снижается содержание парафино-нафтенных компонентов в деасфальтизате, при этом наблюдается суммарный рост доли полиароматических компонентов, что не является желательным для каталитического крекинга, так как увеличивается содержание коксогенных компонентов²².

Таким образом, в процессе деасфальтизации по мере увеличения кратности растворитель:сырье

Таблица 5

Физико-химические свойства потенциального сырья крекинга

Наименование	Вакуумный газойль	Деасфальтизат (пентан:гудрон = 16:1)
Плотность, кг/м ³	913.1	960.9
Содержание металлов V и Ni, г/т	<10	50
Коксуемость, % мас.	0.32	10.3
Содержание серы, % мас.	2.7	2.38
Содержание азота, ppm	877	2083
Динамическая вязкость при 40 °С, Па·с	0.056	14.8
Динамическая вязкость при 80 °С, Па·с	0.008	0.403

Таблица 6

Выход продуктов в результате деасфальтизации

Соотношение сырье:растворитель		1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:8	1:10	1:12	1:14	1:16
нк-80	Деасфальтизат, % мас.	94.81	92.48	88.28	86.67	90.78	92.13	94.81	91.50	89.05	88.82	88.53
	Асфальт, % мас.	5.19	7.52	11.72	13.33	9.22	7.87	5.19	8.50	10.95	11.18	11.47
Изомеризат	Деасфальтизат, % мас.	95.07	92.35	88.63	85.44	80.54	87.94	89.75	88.07	87.23	86.96	86.05
	Асфальт, % мас.	4.93	7.65	11.37	14.56	19.45	12.06	10.24	11.93	12.77	13.04	13.95

Групповой состав исследуемых продуктов

Наименование продукта	Вакуумный газойль	Деасфальтизат (пропан:гудрон)	Деасфальтизат (пентан:гудрон)	Деасфальтизат (фр. нк–80 °С: гудрон)	Деасфальтизат (изомеризат: гудрон)
Парафино-нафтеновые углеводороды	33.0	31.0	17.3	12.9	10.6
Моноциклические арены	29.5	36.2	27.9	32.2	32.4
Полиароматика	37.5	32.7	54.8	54.9	57.0

физико-химические свойства продуктов изменяются нелинейно, поэтому необходимо правильно подбирать условия процесса (количество растворителя, температуру и давление), чтобы получить продукт заданного качества. Преимуществом деасфальтизации на промышленных потоках является высокий выход деасфальтизата – выше чем на пропановой деасфальтизации в 3-4 раза, порядка 80% мас. при несколько худшем качестве самого продукта.

Деасфальтизацией гудрона, полученного из смеси Западносибирской и Каменноложской нефти, возможно получать сырье каталитического крекинга, однако данное сырье будет относиться к III группе сырья крекинга. Поэтому для улучшения качества такого продукта до I и II группы рекомендуется использовать смеси вакуумного газойля и деасфальтизата до 36.5% мас. на *n*-пентане, либо не более 30.0% мас. на изомеризате и фракции нк–80 °С.

Литература

1. Поконова Ю.В. Химия высокомолекулярных соединений нефти. – Л.: Химия, 1980. – 179 с.
2. Ященко И.Г. Ресурсы тяжелых нефтей мира и сравнительный анализ их физико-химических свойств // Геология. – 2012. – №5. – С.47-53.
3. Пресс-релиз: результаты ПАО НК «Роснефть» за 12 мес. 2022 г. // URL: <https://www.rosneft.ru/press/releases/item/214041/>. (Дата обращения: 23.07.2023).
4. Годовой отчет / ПАО «ЛУКОЙЛ». – 2022. – 128 с.
5. А.с. №163698 СССР. Способ двухступенчатой деасфальтизации нефтяных остатков / Золотарев П.А., Герштейн И.А., Кушнир И.Л., Гермаш В.М., Дзюба Н.С., Калантар Н.Г. // Б.И. – 1964. – №13.
6. Капустин В.М., Гуреев А.А. Технология переработки нефти. Часть вторая. Физико-химические процессы. – М.: Химия, 2015. – 400 с.
7. Певнева Г.С., Воронцовская Н.Г., Свириденко Н.Н. Термический и каталитический крекинг смесей асфальтены/мальтены // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. – 2022. – Т.15, №4. – С.466-475.
8. Чудинов А. Н., Першин Д. В., Сорочан Д. Г., Ахrameev Д. С. Исследование продуктов деасфальтизации гудрона *n*-пентаном и их превращение в процессе FCC // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2021. – №2. – С.130-143.
9. Рогачева А. А., Хачатуров-Тавризян А. Е. Каталитический крекинг полимерных отходов как способ внедрения циркулярной экономики // Успехи в химии и химической технологии. – 2022. – №2. – С.18-20.
10. Rodriguez E., Roberto Palos, Gutierrez A., Arandes J. M., Bilbao J. Scrap tires pyrolysis oil as a co-feeding stream on the catalytic cracking of vacuum gasoil under fluid catalytic cracking conditions // Waste Management. – 2020. – V.105. – Pp.18-26.
11. Баландина А. Г., Хангильдин Р. И., Ибрагимов И. Г., Мартяшева В. А. Анализ воздействия предприятий нефтехимического комплекса на гидросферу и пути минимизации их негативного влияния // Баш. хим. ж. – 2015. – Т.22, №1. – С.115-126.

References

1. Pokonova Yu.V. *Khimiya vysokomolekulyarnykh soedineniy nefti* [Chemistry of high molecular weight compounds of petroleum]. Leningrad, Khimiia, 1980. 179 p.
2. Yashchenko I. G. *Resursy tiazhelykh neftey mira i sravnitel'nyi analiz ikh fiziko-khimicheskikh svoystv* [Resources of heavy oils of the world and comparative analysis of their physical and chemical properties.]. *Geologiya* [Geology], 2012, no.5, pp.47-53.
3. *Press-reliz: rezul'taty PAO NK «Rosneft'» za 12 mes. 2022 g.* [Press release: Rosneft's results for the 12 months of 2022]. <https://www.rosneft.ru/press/releases/item/214041/>. (accessed 23.07.2023)
4. *Godovoy otchet PAO «LUKOIL»* [Annual Report PJSC LUKOIL], 2022. 128 p.
5. Zolotarev P.A., Gershtein I.A., Kushnir I.L., Germash V.M., Dziuba N.S., Kalantar N.G. *Sposob dvukhstupenchatoy deasfal'tizatsii neftyanykh ostatkov* [Method of two-stage deasphalting of oil residues]. Patent USSR, no. 163698, 1964.
6. Kapustin V.M., Gureev A.A. *Tekhnologiya pererabotki nefti. Chast' vtoraya. Fiziko-khimicheskie protsessy* [Oil refining technology. Part two. Physico-chemical processes]. Moscow, Khimiya Publ., 2015, 400 p.
7. Pevneva G.S., Voronetskaya N.G., Sviridenko N.N. *Termicheskiy i kataliticheskiy kreking smesey asfal'teny/mal'teny* [Thermal and Catalytic Cracking of Asphaltenes / Maltenes Mixtures]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Khimiya* [Journal of the Siberian Federal University. Chemistry], 2022, vol.15, no.4, pp.466-475.
8. Chudinov A. N., Pershin D. V., Sorochan D. G., Akhrameev D. S. *Issledovanie produktov deasfal'tizatsii gudrona n-pentanom i ikh prevrashchenie v protsesse FCC* [Vacuum residue *n*-pentane-deasphalting products investigation, and deasphalted oil conversion in the FCC process]. *Vestnik PNIPU. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya* [Bulletin of PNIPU. Chemical technology and biotechnology], 2021, no.2, pp. 130-143.
9. Rogacheva A. A., Khachaturov-Tavrizian A. E. *Kataliticheskiy kreking polimernykh otkhodov kak sposob vnedreniya tsirkuliarnoy ekonomiki* [Catalytic cracking of polymer waste as a way to implement a circular economy]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*

12. Ilyin S. O., Ignatenko V. Y., Kostyuk A. V., Levin I. S. Bondarenko G. N. Deasphalting of heavy crude oil by hexamethyldisiloxane: The effect of a solvent/oil ratio on the structure, composition, and properties of precipitated asphaltenes // *Journal of petroleum science and engineering*.– 2022.– V.208.– Pp.109329-109341.
13. Ping-An Du, Man-Nian Ren, Dan Jiang, Zhen-Hui Zhao, Wei-Yong Ying. An experimental study on optimization utilization of deasphalted oil // *Fuel Processing Technology*.– 2012.– V.99.– Pp.64-68.
14. Luo P., Wang X., Gu Y. Characterization of asphaltenes precipitated with three light alkanes under different experimental conditions // *Fluid Phase Equilib. Elsevier B.V.*– 2010.– V.291, №2.– Pp.103-110.
15. Долгих А. В., Рябов В. Г., Чудинов А. Н. Анализ влияния соотношения растворитель:сырье на качество продуктов деасфальтизации гудрона н-пентаном // *Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология*.– 2022.– №4.– С.110-123.
16. Казакова Л. П., Крейн С. Э. Физико-химические основы производства нефтяных масел.– М.: Химия, 1978.– 320 с.
17. Chaiwang P., Chitcharoenyoo H., Piumsomboon P., Chalermnsinsuwan B. Effect of a pulsating flow on hydrodynamics and fluid catalytic cracking chemical reaction in a circulating fluidized bed riser // *Particuology*.– 2022.– V.67.– Pp.47-56.
18. Gulec F., Erdogan A., Clough P. T., Lester E. Investigation of the hydrodynamics in the regenerator of fluid catalytic cracking unit integrated by chemical looping combustion // *Fuel Processing Technology*.– 2021.– V.223.– Pp.106998-107011.
19. Патент №2624443 РФ. Катализатор для каталитического крекинга углеводородов / Хаяси С., Аракава С., Сакаи С. // Б.И.– 2017.– №28.
20. Задегбейджи Р. Каталитический крекинг в псевдоожиженном слое катализатора.– СПб.: ЦОП «Профессия», 2014.– 384 с.
21. Лучкин Р. С. Коррозия и защита металлических материалов (структурные и химические факторы).– Тольятти: ТГУ, 2017.– 269 с.
22. Дезортцев С. В., Петров А. М. Влияние природы углеводородных растворителей на результаты деасфальтизации гудрона западносибирской нефти // *Баш. хим. ж.*– 2014.– Т.21, №2.– С.28-37.
- [Advances in chemistry and chemical technology], 2022, no.2, pp.18-20.
10. Rodriguez E., Roberto Palos, Gutierrez A., Arandes J. M., Bilbao J. [Scrap tires pyrolysis oil as a co-feeding stream on the catalytic cracking of vacuum gasoil under fluid catalytic cracking conditions]. *Waste Management*, 2020, vol.105, pp.18-26.
11. Balandina A.G., Khangil'din R.I., Ibragimov I.G., Martiasheva V.A. *Analiz vozdeistviya predpriyatiy neftekhimicheskogo kompleksa na gidrosferu i puti minimizatsii ikh negativnogo vliianiya* [Analysis of the influence of the petrochemical complex on the hydrosphere and ways to minimize the negative influence]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2015, vol.22, no.1, pp.115-126.
12. Ilyin S.O., Ignatenko V.Y., Kostyuk A.V., Levin I.S. Bondarenko G.N. [Deasphalting of heavy crude oil by hexamethyldisiloxane: The effect of a solvent/oil ratio on the structure, composition, and properties of precipitated asphaltenes]. *Journal of petroleum science and engineering*, 2022, vol.208, pp.109329-109341.
13. Ping-An Du, Man-Nian Ren, Dan Jiang, Zhen-Hui Zhao, Wei-Yong Ying. [An experimental study on optimization utilization of deasphalted oil]. *Fuel Processing Technology*, 2012, vol.99, pp. 64-68.
14. Luo P., Wang X., Gu Y. [Characterization of asphaltenes precipitated with three light alkanes under different experimental conditions]. *Fluid Phase Equilib*, 2010, vol.291, no.2, pp.103-110.
15. Dolgikh A.V., Ryabov V.G., Chudinov A.N. *Analiz vliianiya sootnosheniya rastvoritel'syr'e na kachestvo produktov deasfal'tizatsii gudrona n-pentanom* [Effect of the solvent-to-feed ratio on the products quality in the process of the vacuum residue deasphalting with n-pentane]. *Vestnik PNIPU. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya* [Bulletin of PNIPU. Chemical technology and biotechnology], 2022, no.4, pp. 110-123.
16. Kazakova L. P., Krein S. E. *Fiziko-khimicheskie osnovy proizvodstva neftyanykh masel* [Physico-chemical fundamentals of petroleum oil production]. Moscow, Khimiya Publ., 1978, 320 p.
17. Chaiwang P., Chitcharoenyoo H., Piumsomboon P., Chalermnsinsuwan B. [Effect of a pulsating flow on hydrodynamics and fluid catalytic cracking chemical reaction in a circulating fluidized bed riser]. *Particuology*, 2022, vol.67, pp.47-56.
18. Gulec F., Erdogan A., Clough P. T., Lester E. [Investigation of the hydrodynamics in the regenerator of fluid catalytic cracking unit integrated by chemical looping combustion]. *Fuel Processing Technology*, 2021, vol.223, pp.106998-107011.
19. Khayasi S., Arakava S., Sakai S. *Katalizator dlya kataliticheskogo krekinga uglevodorodov* [Catalyst for catalytic cracking of hydrocarbons]. Patent RF, no.2624443, 2013.
20. Zadegeidzhi R. *Kataliticheskiy kreking v psevdoozhizhenom sloe katalizatora* [Fluid Catalytic Cracking]. Saint Petersburg, Professiya Publ., 2014, 384 p.
21. Luchkin R.S. *Korroziya i zashchita metallicheskiykh materialov (strukturnye i khimicheskie faktory)* [Corrosion and protection of metallic materials (structural and chemical factors)]. Tol'yatti, TGU Publ., 2017, 269 p.
22. Dezortsev S.V., Petrov A.M. *Vliyanie prirody uglevodorodnykh rastvoriteley na rezul'taty deasfal'tizatsii gudrona zapadnosibirskoy nefti* [The hydrocarbon's solvents nature influence on the results of west Siberian oil tar deasphalting]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2014, vol.21, no.2, pp.28-37.