

DOI: 10.15593/2224-9400/2017.4.12

УДК 665.64

А.Н. Чудинов, Е.С. Денисламова, Д.Н. КожевниковПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ
И АКТИВНОСТИ ЦЕОЛИТНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ
КРЕКИНГА В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ**

На сегодняшний день подавляющее большинство нефтеперерабатывающих предприятий эксплуатирует установки каталитического крекинга (КК). Процесс крекинга в псевдоожигенном слое катализатора (ККФ) является более перспективным в сравнении с процессом, реализуемым на установках с движущимся слоем катализатора.

Цеолитные катализаторы сохраняют лидирующую позицию в нефтепереработке по экономическим и технологическим показателям. Современные микросферические катализаторы, применяемые в процессе ККФ, представляют собой сложную систему, включающую в себя ряд компонентов: матрицу из аморфных алюмосиликатов, активный компонент – цеолиты и ряд добавок, чаще всего оксидов металлов, повышающих активность катализатора. Выбор катализатора процесса ККФ играет значительную роль в эффективной работе установки, влияет на количество и состав образующихся продуктов. На данный момент существует целый ряд компаний-производителей катализаторов процесса ККФ, предлагающих широкий ассортимент продукции. Испытание каждого образца катализатора в условиях промышленной установки является нецелесообразным экономически, поэтому для грамотного и взвешенного подбора типа катализатора требуется провести целый ряд лабораторных испытаний.

Данная работа посвящена исследованию физико-химических параметров и активности двух образцов катализаторов. Для катализаторов были определены величины удельной поверхности, насыпной плотности, устойчивости к истиранию, распределение по размеру частиц. Для исследуемых образцов катализаторов при разных соотношениях катализатор и сырья (К/С) была изучена их активность в процессе ККФ, установлена степень конверсии сырья, выход жидких и газообразных продуктов, степень закоксованности.

Ключевые слова: каталитический крекинг в псевдоожигенном слое, цеолитный катализатор, нефтепереработка.

A.N. Chudinov, E.S. Denislamova, D.N. Kozhevnikov

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

FLUID CATALYTIC CRACKING ZEOLITE CATALYSTS PARAMETERS AND ACTIVITY EVALUATION

Nowadays the most of oil processing plants use catalytic cracking units. Fluid catalytic cracking (FCC) is more prospective process as compared with moving bed cracking units.

Zeolite catalysts are conventional and one of the most economically effective in oil processing industry. Modern FCC catalysts are complicated system which consists of amorphous aluminosilicate matrix, active zeolite, and different metal oxide additives. To choose correct catalyst is very important question to operate FCC unit maximally effective. At present there are several companies offering a wide range of FCC catalyst. Since testing each of them in industrial scale is economically impractical, complex of lab experiments is required to find the most effective catalyst.

This work describes research results of two different FCC catalyst samples evaluation. Specific surface area, apparent bulk density, attrition resistance, and particle size distribution were determined for both catalyst samples. Conversion, gas, liquid, and coke yields were found during catalyst microactivity tests with different cat-to-oil ratios.

Keywords: *fluid catalytic cracking, zeolite catalyst, oil processing.*

Каталитический крекинг является одним из основных процессов переработки нефтепродуктов с целью получения высокооктановых компонентов бензина. Эффективность процесса определяется как свойствами сырьевых компонентов, подвергающихся переработке, так и параметрами катализаторов, применяемых на конкретной установке.

Активным компонентом катализатора ККФ является цеолит. На сегодняшний день известен целый ряд цеолитов как природных, так и синтетических, но лишь некоторые из них находят применение в качестве компонентов катализаторов. В частности, для производства катализаторов ККФ наиболее часто используют цеолиты типа X, Y и ZSM-5 [1]. В качестве матрицы катализатора обычно используют оксид алюминия и аморфные алюмосиликаты. Активная матрица вносит свой вклад в общую производительность катализатора, поскольку поры цеолита могут иметь недостаточный размер для крекирования крупных молекул

тяжелых углеводородов с температурой кипения выше 480 °С [1]. Кроме того, для повышения активности катализатора в него вводят различные добавки, назначение которых может быть следующим: активатор горения CO, снижение содержания SO_x и NO_x и др. [1].

В качестве сырьевых компонентов КК используются в том числе вакуумные дистиллятные фракции, в процессе превращения которых происходит закоксовывание катализатора и его отравление серой и тяжелыми металлами (V и Ni). На данный момент сохраняется тенденция по утяжелению фракционного состава сырья, вовлекаемого в процесс ККФ, что приводит к увеличению содержания в сырье полиядерной ароматики, серы, азота и тяжелых металлов, также возрастает коксуемость сырья [2].

Актуальными на сегодняшний день являются задачи увеличения глубины процесса КК и повышения его селективности, а также сохранения активности катализатора в течение длительного периода эксплуатации.

Авторами [3] была изучена проблема быстрой дезактивации катализаторов вследствие высокого содержания в сырье металлов и частично связанного с этим высокого коксообразования. Содержащиеся в тяжелых нефтяных фракциях порфириновые соединения металлов, прежде всего никеля и ванадия, при высоких температурах разлагаются на поверхности микросферических цеолитсодержащих катализаторов крекинга, отравляют их и снижают тем самым активность катализатора и эффективность процесса в целом. Исследования показали, что разложение металлопорфиринов в условиях каталитического крекинга происходит в три стадии: 1) термическое разложение на металл и порфирин; 2) термический крекинг порфирина с образованием первичных продуктов и кокса; 3) каталитические превращения первичных продуктов термокрекинга. Процессы разложения порфириновых структур в условиях каталитического крекинга значительно различаются в зависимости от координированного металла. Никель обладает гидрирующими/дегидрирующими свойствами, что в целом определяет направление третьей стадии превращения металлопорфирина в условиях каталитического крекинга. Бифункциональность каталитической системы способствует дополнительному вкладу реакций перераспределения водорода, что приводит к большему выходу кокса и меньшему выходу жидких продуктов [3].

Решить указанные задачи можно несколькими путями, в том числе с помощью создания новых катализаторов [4–7] либо с помощью модификации уже существующих путем введения в них добавок [8–13].

Исследованием нового катализатора занимались А.Б. Бодрый и Э.М. Рахматуллин [4]. Был проведен комплекс исследовательских работ по созданию гранулированных катализаторов крекинга в лабораторном, опытно-промышленном и промышленном масштабах. За это время было опробовано несколько способов их производства, а также рассмотрено множество вариантов технологического и аппаратурного оформления процесса. Результатом их исследовательской деятельности стали катализаторы серии «Адамант», которые не уступают импортным аналогам, а по ряду параметров даже превосходят. Основу катализатора составляет цеолит RENU, имеющий специально подобранный химический состав и уникальную микро/мезопористую структуру. Цеолит устойчив к воздействию высоких температур и каталитических ядов, имеет низкую селективность по коксу и сухому газу и высокую селективность по бензину. Катализатор обладает большим объемом пор и благоприятной для крекинга тяжелых углеводородных молекул пористой структурой. А дополнительное введение активного наноструктурированного алюминия в матрицу катализатора обеспечивает его участками первичного крекинга [4].

В работе [5] также описан новый состав катализатора КК на основе мезопористых алюмосиликатов. С помощью варьирования условий синтеза могут быть получены алюмосиликаты с широким спектром физико-химических свойств. Авторами были созданы несколько образцов катализаторов с различным соотношением Al и Si. Два лучших из них имели показатели выхода бензина 26 и 21 %.

Группой исследователей [6] была предложена технология создания микросферического катализатора «Октифайн». Один из катализаторов «Октифайн-480П» является классическим вариантом катализатора крекинга, действие которого направлено на увеличение выхода бензиновой фракции в процессе крекинга. Такое действие достигается благодаря особенностям строения катализатора: устойчивый к дезактивации ультрастабильный цеолит с уникальной микро/мезопористой структурой в сочетании с высокоселективной матрицей, содержащей в своем составе наноструктурированный оксид алюминия, максимально снижают перекрекинг (расщепление углеводородов до газа и кокса) легких углеводородов и увеличивают селективный крекинг тяжелых фракций. В состав катализатора входит 0,27 % Na_2O , около 2,3 % оксидов редкоземельных элементов, его удельная площадь не менее $300 \text{ м}^2/\text{г}$, насыпная плотность 0,75–0,85. Их технология позволяет в широких пределах варьировать их физи-

ко-химические свойства и создавать катализаторы, высокоселективные в отношении выхода различных продуктов крекинга (сжиженных газов, бензина, дизельного топлива и пр.) [6].

Авторы статьи [7] предложили создание катализатора из бентонитового сырья. Ими был изучен состав данного сырья, в нем было около 74 % оксида кремния и 26 % оксида алюминия. Разработанный ими катализатор дал положительный результат: повысилось октановое число выходящего бензина, но выход его был невысок 25–32 %. Ученными запланированы дальнейшие исследования в данной области.

В статье И.М. Глинкина и С.А. Кудрявцева [8] предложен состав нового катализатора. Каталитическая система состоит из катализатора с начальным размером частиц $\approx 200\text{--}300$ мкм и диспергирующего материала, который представляет собой стеклянные шарики с диаметром 1–1,2 мм. При диспергировании частичек катализатора образуются наночастицы с гиперактивной поверхностью. Это решение позволило увеличить селективность процесса по светлым нефтепродуктам, что существенно сокращает затраты на стадии разделения нефтепродуктов, что дает экономический эффект.

Модернизация катализатора описана В.П. Дорониным и П.В. Липиным в статье [9]. Они предлагают либо смешивать готовый катализатор с добавками, либо внедрять их на стадии формирования композиции каталитической системы. В качестве добавок предложено использовать смешанные магний-алюминиевые и цинк-магний-алюминиевые оксиды, модифицированные цеолиты типа Y и ZSM-5 или их смеси. Данные добавки позволили снизить содержание серы в бензине крекинга.

С целью повышения выхода олефинов $C_3\text{--}C_4$ в процессе КК предложено модифицировать цеолитный катализатор фосфором [10]. Введение фосфора в состав катализатора привело к снижению удельной площади поверхности и объема пор, что обусловлено блокировкой каналов цеолита, но при этом наблюдается увеличение выхода газовой фракции и рост селективности образования олефинов C_3 и C_4 .

В работе [11] было исследование влияние содержания редкоземельных элементов (РЗЭ) в составе катализатора каталитического крекинга на его свойства. Было установлено, что приемлемый уровень конверсии сырья 77–78 % достигается при содержании РЗЭ в катализаторе около 0,5 мас. %. Показана зависимость вклада реакций переноса водорода от содержания РЗЭ в катализаторе крекинга на примере изменения концентрации изобутана в сумме образующихся C_4 -углеводородов. По итогам промышленной эксплуатации катализатор с пониженным содер-

жанием РЗЭ (1,2 мас. %) обладает высокой активностью при повышенной селективности превращения вакуумного газойля в бензин, низкой селективностью по коксу, высоким выходом легких олефинов – ценного сырья для нефтехимии.

Одной из актуальных проблем КК является содержание серы в продуктах. Данная проблема изучена А.П. Гловым и А.Г. Никифоровой [12]. Они опытным путем нашли оптимальное содержание добавки La/MCM-41/ γ -Al₂O₃ и La/HMS/ γ -Al₂O₃ в катализаторе. Введение добавки позволяет получать жидкие продукты крекинга вакуумного газойля с пониженным содержанием сероорганических соединений.

В работе [13] авторы рассматривают каталитические добавки. Они предлагают каталитическую добавку на основе ферросфер энергетических зол. Наиболее сильное влияние ферросферы оказывают в крекинге парафинистого сырья: содержание светлых фракций в продуктах крекинга нефти по сравнению с термокрекингом увеличивается приблизительно на 20 % и составляет 67 %, в светлых продуктах крекинга мазута в 14 раз возрастает доля бензиновой фракции. За счет деструкции смол и асфальтенов тяжелого парафинистого сырья, особенно мазута, увеличивается образование компонентов масел, в которых возрастает содержание *n*-алканов и доля в них легких (C₈–C₂₀) углеводородов. В процессе крекинга происходит изменение фазового состава и структурных характеристик железооксидных фаз ферросфер, наблюдается отложение на их поверхности углеродистых образований, различающихся реакционной способностью в реакции горения, и концентрирование сернистых соединений из нефтяного сырья. Предполагается, что в деструкции высокомолекулярных компонентов тяжелого нефтяного сырья активность проявляет дефектная оксидная система – ферритовая шпинель-гематит, формирующаяся из высокожелезистых расплавов Fe_xO_y–CaO–SiO₂–Al₂O₃.

В.П. Доронин и П.В. Липин [14] провели сравнение двух катализаторов: бицеолитного глубокого каталитического крекинга ГГК и катализатора серии ЛЮКС. Исследования показали, что для достижения высоких степеней превращения вакуумного газойля на катализаторе ГГК, сопоставимых с получаемыми на катализаторе ЛЮКС, крекинг необходимо проводить в условиях повышенной сложности. На катализаторе ЛЮКС выход бензина составляет около 37–45 %, в то время как на ГГК лишь 30 % при одинаковых условиях.

И.Ю. Козловская и В.Н. Марцуль [15] предложили метод использования отработанного катализатора, изучив его свойства. В работе были проведены исследования состава и сорбционных свойств отрабо-

танного катализатора каталитического крекинга. Сравнительный анализ сорбционных свойств синтетических цеолитов типа NaA и CaX и отработанного цеолитсодержащего катализатора по ионам меди и железа показал, что сорбционная емкость отработанного катализатора сравнима с сорбционной емкостью синтетических цеолитов. Это свидетельствует о целесообразности его использования в процессах очистки сточных вод от ионов меди и железа.

Экспериментальная часть

В работе использовали два образца цеолитных равновесных катализаторов разных производителей. Подготовка катализаторов к испытанию заключалась в их прокаливании при 540 °С в течение 6 ч и последующем просеивании с получением фракции 40–20 мкм. Удельную поверхность образцов катализаторов определяли на приборе по адсорбции азота с применением теории БЭТ на приборе Micromeritics Gemini VII в режиме «singlepoint». Насыпную плотность находили, взвешивая 25 мл катализатора в неутрамбованном виде. Истираемость катализатора – это его способность сохранять неизменным распределение частиц по размерам в ходе интенсивного перемешивания в псевдооживленном слое. Численное значение истираемости характеризует индекс Дэйвисона (DI). При слишком малой истираемости катализатора (высокая твердость частиц) возможно повреждение частей установки каталитического крекинга за счет интенсивной эрозии. При чрезмерно высокой истираемости (малая твердость частиц) содержание мелкой фракции в катализаторе быстро увеличивается за счет истирания, что приводит к высоким потерям катализатора с отходящими продуктами в виде пыли. В ходе анализа процесс истирания моделируется с помощью закручивания на высокой скорости небольшого количества катализатора струей воздуха в специальном сосуде для истирания, закрепленном в нижней части циклона. Распределение по размеру частиц. Исследование распределения размера частиц катализаторов основано на дифракции лазерного излучения. Измерения проводили на лазерном анализаторе Microtrac S3500, снабженном ультразвуковой баней. Образец катализатора диспергируют в воде. Распределение размера частиц рассчитывают по рассеянию лазерного луча с применением модели Фраунгофера.

Активность катализаторов исследовали на реакторной установке ACE R+ (Kayser Technology Inc., США) при температуре 530 °С, режим псевдооживления создавали с помощью азота. Массовое соотношение К/С составляло 5, 6 и 7,5. Испытания проводили в соответствии со стандартом ASTM D7206/D7206M. Содержание кокса на катализаторе

определяли с помощью ИК-ячейки по количеству CO_2 , выделившегося в процессе регенерации катализатора.

Состав газообразных продуктов крекинга анализировали на газовом хроматографе Agilent 7890В с пламенно-ионизационным детектором для определения углеводородов и детектором по теплопроводности для анализа водорода. Метод определения фракционного состава жидких продуктов крекинга реализован на газовом хроматографе Agilent 7890В с пламенно-ионизационным детектором. Используется капиллярная колонка с внутренним диаметром 0,53 мкм и длиной 5 м. В качестве газа-носителя используется гелий. Обработка результатов хроматографии проводилась с использованием специального программного обеспечения AC SimDis.

Результаты и их обсуждение

Для исследуемых образцов катализаторов были определены величины удельной поверхности, насыпной плотности, устойчивости к истиранию, распределение по размеру частиц (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Физико-химические параметры катализаторов FCC

Параметр	Катализатор 1	Катализатор 2
Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	137	134
Насыпная плотность, $\text{г}/\text{мл}$	0,840	0,841
Индекс Дэйвисона	5,1	5,0

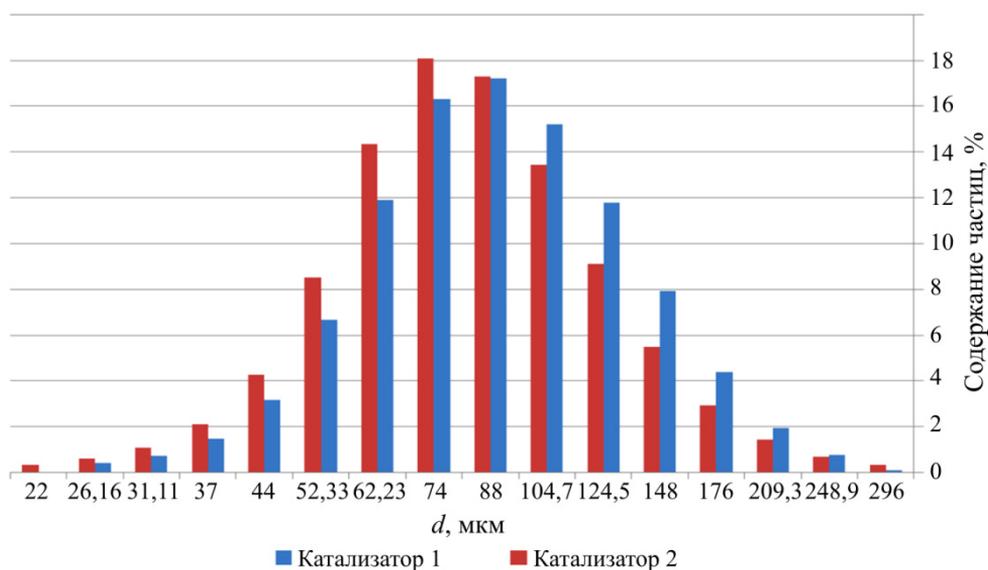


Рис. 1. Распределение по размеру частиц непросеянного катализатора

Из табл. 1 видно, что испытываемые катализаторы имеют сходные характеристики, наблюдаются небольшие различия в величине удельной поверхности. Катализатор 2 имеет более широкое распределение по размеру частиц до просеивания.

В качестве сырья процесса крекинга был использован вакуумный газойль с АВТ (ВГ) со следующими свойствами:

температура выкипания, °С, при фракционном составе (ASTM 7213), мас. %:

н.к.	248,4
10	346,2
50	427,6
90	516,8
к.к.	577,6
плотность, г/см ³	0,918
коксуемость по Конрадсону, мас. %	0,65

Состав газообразных продуктов крекинга определяли методом газовой хроматографии на приборе Agilent 7890В, снабженном капиллярной колонкой, пламенно-ионизационным детектором для анализа углеводородов и детектором по теплопроводности для определения водорода в газообразных продуктах. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Состав газообразных продуктов крекинга

Компонент	Соотношение К/С					
	Катализатор 1			Катализатор 2		
	5	6	7	5	6	7
Водород	0,27	0,25	0,26	0,11	0,12	0,13
Метан	0,74	0,82	0,97	0,73	0,83	0,98
Этан	0,51	0,56	0,64	0,54	0,59	0,66
Этилен	0,76	0,90	1,10	0,67	0,75	0,86
Пропан	1,14	1,37	1,74	1,05	1,22	1,47
Пропилен	5,92	6,74	7,49	5,26	5,57	5,86
Изобутан	0,86	0,97	1,15	0,91	1,03	1,21
н-Бутан	3,91	4,55	5,45	3,84	4,37	5,04
Олефины С ₄	6,50	6,77	6,86	6,57	6,57	6,47
Бутадиен	0,08	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03

Как видно из табл. 2, при превращении ВГ на катализаторе 1 образуется большее количество водорода и углеводородов С₁–С₄, особенно пропилена и олефинов С₄, представляющих интерес для процес-

сов алкилирования и нефтехимического синтеза. Также на катализаторе 1 наблюдается более высокая степень конверсии при величине К/С 6 и 7 (рис. 2), что можно объяснить несколько большей величиной удельной поверхности у катализатора 1.

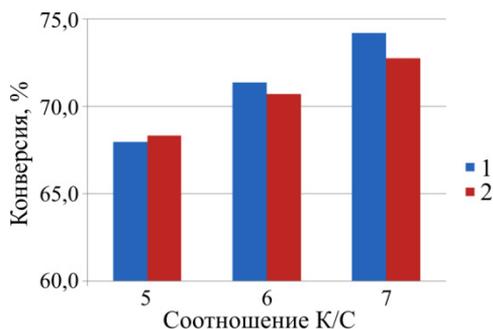


Рис. 2. Зависимость степени конверсии ВГ от величины К/С

С другой стороны на катализаторе 1 наблюдается образование большего количества кокса и меньше выход бензиновой фракции (н.к. – 221 °С) (рис. 3, 4).

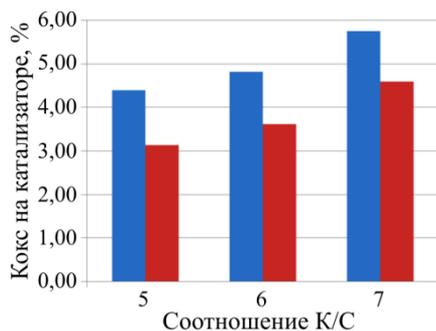


Рис. 3. Количество кокса на катализаторе

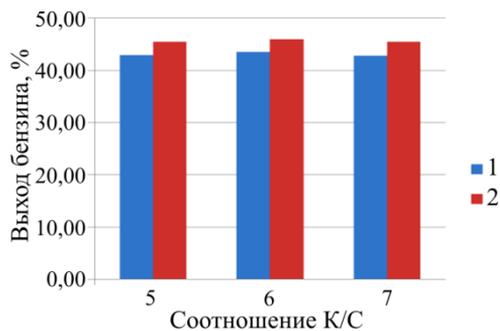


Рис. 4. Зависимость выхода бензина от величины К/С

По результатам испытаний катализаторов и анализа продуктов крекинга был сделан вывод, что в данных условиях оптимальное соотношение К/С с учетом степени конверсии, выхода бензина и количества образующегося кокса равно 6. Причем в целях получения наибольшего количества бензина более подходящим является катализатор 2.

С целью определения сохранения катализатором активности при повторном использовании исследовали превращение ВГ на образцах катализаторов после регенерации (табл. 3).

Таблица 3

Степень конверсии, выход бензина и количество кокса (мас. %) при повторных испытаниях катализаторов (K/C = 6)

Показатель	Катализатор 1		Катализатор 2	
	исходный	после регенерации	исходный	после регенерации
Конверсия	71,38	71,12	70,71	71,09
Выход бензина	43,6	41,85	46,04	46,26
Количество кокса	4,82	3,49	3,61	3,74

Процесс регенерации катализатора проводился в токе воздуха при 700 °С для удаления кокса.

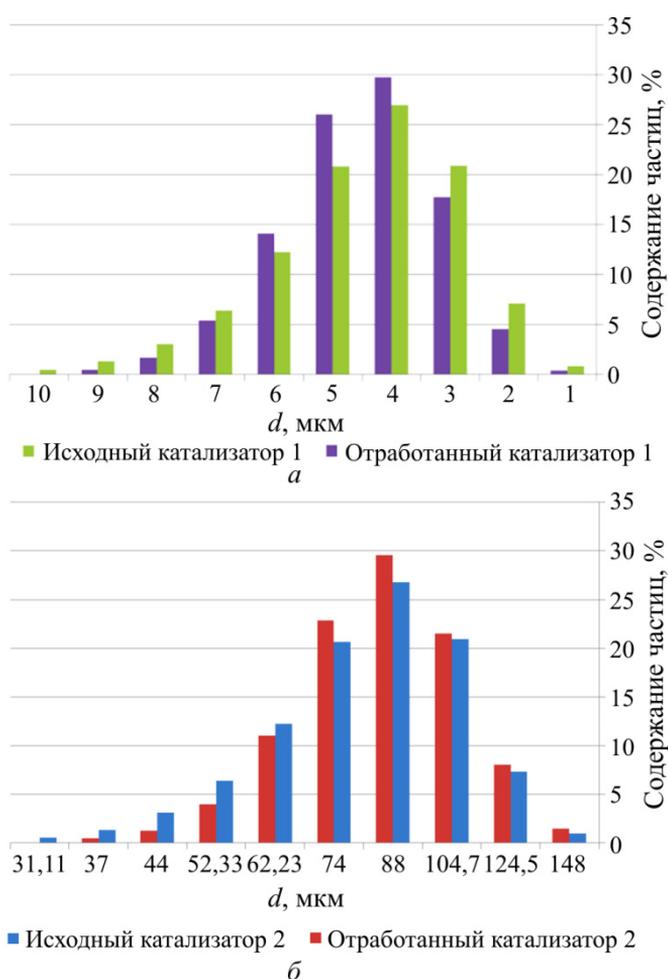


Рис. 5. Изменение распределения частиц катализаторов по размеру: а – катализатор 1; б – катализатор 2

Как видно из табл. 3, на катализаторе 1 после регенерации несколько снижается выход бензина. На катализаторе 2 выход бензина после регенерации практически не изменяется. Степень конверсии сырья на обоих образцах остается на одном уровне. Кроме того, как показано на рис. 5, *а, б*, наблюдается изменение распределения по размеру частиц катализаторов после проведения процесса крекинга и регенерации.

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Физико-механические параметры двух образцов катализаторов близки по своим значениям.
2. Проведение процесса FCC на катализаторе 1 позволяет получать большее количество углеводородов C_3 – C_4 , конверсия сырья в большей степени зависит от соотношения K/C .
3. При переработке вакуумного газойля на катализаторе 2 достигается более высокий выход бензиновой фракции, на катализаторе образуется меньше кокса.
4. При повторном использовании катализаторов после регенерации их активность практически не меняется.

Список литературы

1. Задегбейджи Р. Каталитический крекинг в псевдооживленном слое катализатора. Справочник по эксплуатации, проектированию и оптимизации установок ККФ. – СПб.: Профессия, 2014. – 384 с.
2. Капустин В. М., Гуреев А.А. Технология переработки нефти. – Ч. 2. Физико-химические процессы. – М.: Химия, 2015. – 400 с.
3. Сорокина Т.П., Булчевская Л.А. Превращение порфиринов никеля и ванадия в условиях каталитического крекинга // Нефтехимия. – 2010. – Т. 50, № 1. – С. 52–56.
4. Бодрый А.Б., Рахматуллин Э.М. О новых гранулированных катализаторах каталитического крекинга // Катализ в промышленности. – 2014. – № 5. – С. 19–22.
5. Лысенко С.В., Крюков И.О. Свойства мезопористых алюмосиликатов, полученных с использованием неионогенных ПАВ // Вестник Моск. университета. – 2011. – Т. 52, № 2. – С. 139–144.
6. Бодрый А.Б., Усманов И.Ф. Отечественные микросферические катализаторы крекинга: разработка, производство и опыт промышленной эксплуатации // Катализ в промышленности. – 2014. – № 5. – С. 14–18.
7. Мадаева А.Д. Испытание катализаторов крекинга нефтяных фракций из местного бентонитового сырья // Аспирант. – 2015. – № 1(6). – С. 33–35.

8. Кашеев А.С., Глинкина И.М., Кудрявцев С.А. Изучение поведения цеолитсодержащего катализатора типа Y в условиях аэрозольного нанокатализа // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 2, № 6. – С. 98–102.

9. Доронин В.П., Липин П.В. Перспективные разработки: катализаторы крекинга и добавки к ним // Катализ в промышленности. – 2014. – № 5. – С. 82–87.

10. Высоцкий В.В., Липин П.В. Каталитический крекинг вакуумного газойля на модифицированных фосфором цеолитах типа ZSM 5 // Ученые Омска – региону: Материалы II регион. науч.-техн. конф. – Омск, 2017. – С. 184–189.

11. Доронин В.П., Сорокина Т.П. Разработка и внедрение цеолитсодержащих катализаторов крекинга с контролируемым содержанием редкоземельных элементов // Катализ в промышленности. – 2014. – № 5. – С. 9–13.

12. Серопонижающие добавки на основе MCM-41 и HMS в каталитическом крекинге вакуумного газойля / А.П. Готов, А.Г. Никифорова, Н.С. Лешаков, С.В. Лысенко, Э.А. Караханов // XX Менделеевский съезд по общей прикладной химии. – Екатеринбург, 2016. – С. 106.

13. Головкин А.К., Копытов М.А. Крекинг тяжелого нефтяного сырья с использованием каталитических добавок на основе ферросфер энергетических зол // Катализ в промышленности. – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 62–72.

14. Доронин В.П., Липин П.В. Влияние условий проведения процесса на состав продуктов при традиционном и глубоком каталитическом крекинге нефтяных фракций // Катализ в нефтеперерабатывающей промышленности. – 2012. – № 1. – С. 27–32.

15. Козловская И.Ю., Марцунь В.Н. Свойства отработанного катализатора каталитического крекинга и возможности его применения для сорбционной очистки сточных вод // Химия и технология неорганических веществ. – 2010. – Вып. 18, сер. 3. – С. 127–130.

References

1. Zadegeidzhi R. Kataliticheskii kreking v psevdoozhivennom sloe katalizatora [Catalytic cracking fluidized-bed catalyst.]. Saint Petersburg, Professia, 2014, 384 p.

2. Kapustin V.M., Gureev A.A. Tekhnologiya pererabotki nefli. Chast 2. Fiziko-khimicheskie protsessy [The technology of oil refining. Part 2. Physico-chemical processes]. Moscow, Khimiia, 2015, 400 p.

3. Sorokina T.P., Buluchevskaia L.A. Prevrashchenie porfirinov nikelia i vanadiia v usloviakh kataliticheskogo krekinga [The transformation of the porphyrin Nickel and vanadium in the catalytic cracking conditions]. *Neftekhimiia*, 2010, vol. 50, no.1, pp. 52-56.

4. Bodryi A.B., Rakhmatullin E.M. O novykh granulirovannykh katalizatorakh kataliticheskogo krekinga [About new granulated catalysts for catalytic cracking]. *Kataliz v promyshlennosti*, 2014, no.5, pp. 19-22.

5. Lysenko S.V., Kriukov I.O. Svoistva mezoporistykh aliumosilikatov, poluchennykh s ispol'zovaniem neionogennykh PAV [Properties of mesoporous aluminosilicates obtained by using nonionic surfactant]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta*, 2011, vol. 52, no. 2, pp. 139-144.

6. Bodryi A.B., Usmanov I.F. Otechestvennyye mikrosfericheskie katalizatory krekinga: razrabotka, proizvodstvo i opyt promyshlennoi ekspluatatsii [Domestic microspherical cracking catalysts: development, manufacture and commercial operation experience]. *Kataliz v promyshlennosti*, 2014, no.5, pp. 14-18.

7. Madaeva A.D. Ispytanie katalizatorov krekinga neftiannykh fraktsii iz mestnogo bentonitovogo syr'ia [Testing of catalysts for cracking oil fractions of local bentonite raw material]. *Aspirant*, 1(6), 2015, pp. 33-35.

8. Kashcheev A.S., Glinkina I.M., Kudriavtsev S.A. Izuchenie povedeniia tseolitsoderzhashchego katalizatora tipa Y v usloviakh aerol'nogo nanokataliza [The study of the behavior of the catalyst zeolite type Y in terms of aerosol nanocatalysis]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii*, 2013, vol. 2, no. 6, pp. 98-102.

9. Doronin V.P., Lipin P.V. Perspektivnye razrabotki: katalizatory krekinga i dobavki k nim [Future developments: the cracking catalysts and additives to them]. *Kataliz v promyshlennosti*, 2014, no. 5, pp. 82-87.

10. Vysotskii V.V., Lipin P.V. Kataliticheskii kreking vakuumnogo gazoila na modifitsirovannykh fosforom tseolitakh tipa ZSM 5 [Catalytic cracking of vacuum gasoil on phosphorus-modified zeolites of type ZSM 5]. *Materialy II Regional'noi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*, 2017. pp. 184-189.

11. Doronin V.P., Sorokina T.P. Razrabotka i vnedrenie tseolitso-derzhashchikh katalizatorov krekinga s kontroliruемым soderzhaniiem redkozemel'nykh elementov [Development and implementation of a zeolite-containing cracking catalysts with controlled content of rare earth elements]. *Kataliz v promyshlennosti*, 2014, no. 5, pp. 9-13.

12. Glotov A.P., Nikiforova A.G., Levshakov N.S, Lysenko S.V., Karakhanov E.A. Seroponizhaiushchie dobavki na osnove MSM-41 i HMS v kataliticheskom krekinge vakuumnogo gaizoilia [Sulfur reduction additives based on MCM-41 and HMS in the catalytic cracking of vacuum gasoil]. *XX Mendeleevskii s"ezd po obshchei prikladnoi khimii*, Ekaterinburg, 2016, P. 106.

13. Golovko A.K., Kopytov M.A. Kreking tiazhelogo neftianogo syr'ia s ispol'zovanie kataliticheskikh dobavok na osnove ferrosfer energeticheskikh zol [Cracking of heavy oil feedstock with the use of catalytic additives on the basis of ferrosfer energy evils]. *Kataliz v promyshlennosti*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 62-72.

14. Doronin V.P., Lipin P.V. Vliianie uslovii provedeniia protsessa na sostav produktov pri traditsionnom i glubokom kataliticheskom krekinge neftianyx fraktsii [The influence of process conditions on the composition of the products in the traditional and the deep catalytic cracking of petroleum fractions]. *Kataliz v neftepererabatyvaiushchei promyshlennosti*, 2012, no.1, pp. 27-32.

15. Kozlovskaiia I.Iu., Martsul' V.N. Svoistva otrabotannogo katalizatora kataliticheskogo krekinga i vozmozhnosti ego primeneniia dlia sorbtionnoi ochistki stochnykh vod [The properties of spent catalyst from catalytic cracking and its application for sorption treatment of waste water]. *Khimiia i tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv*, 2010, iss. 18, seria 3, pp. 127-130.

Получено 30.10.2017

Об авторах

Чудинов Александр Николаевич (Пермь, Россия) – кандидат химических наук, доцент кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: can_16@mail.ru).

Денисламова Екатерина Сергеевна (Пермь, Россия) – кандидат химических наук, доцент кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: katherin85@mail.ru).

Кожевников Дмитрий Николаевич (Пермь, Россия) – магистрант кафедры химических технологий Пермского национального ис-

следовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: can_16@mail.ru).

About the authors

Aleksandr N. Chudinov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: can_16@mail.ru).

Ekaterina S. Denislamova (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: katherin85@mail.ru).

Dmitrii N. Kozhevnikov (Perm, Russian Federation) – Undergraduate student, Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: can_16@mail.ru).