

ПРЕВРАЩЕНИЕ ПРЯМОГОННОГО БЕНЗИНА В C₅–C₆ АЛКАНЫ НА КОМПОЗИЦИОННЫХ КАТАЛИЗАТОРАХ Co(Ni)/HZSM-5/SO₄²⁻-ZrO₂

© С. И. Абасов, С. Б. Агаева, М. Т. Мамедова,* А. А. Искендерова,
А. А. Иманова, Р. Р. Зарбалиев, Е. С. Исаева, Д. Б. Тагиев

Институт нефтехимических процессов им. Ю. Г. Мамедалиева НАН Азербайджана, Баку

* E-mail: memmedova-melahet@mail.ru

Поступила в Редакцию 29 июня 2018 г.

После доработки 6 ноября 2018 г.

Принята к публикации 29 ноября 2018 г.

Изучено превращение прямогонного бензина на композиционных каталитических системах, содержащих цеолит HZSM-5, модифицированный 0.4 мас% Co или Ni и 15% SZ (10% SO₄²⁻/ZrO₂), при атмосферном давлении в интервале 140–200°C. Показано, что при 140–200°C основными продуктами превращения прямогонного бензина являются C₅–C₆ алканы разветвленного строения. С ростом температуры T ≥ 180°C продукты превращения обогащаются газообразными алканами. На основе анализа продуктов превращения сделано предположение о реализации процесса через образование скелетноизомеризованного интермедиата и его последующего расщепления (диспропорционирования) по β- или α-связи. Приведены результаты, показывающие влияние условий проведения процесса и восстановления композиционной каталитической системы на превращения. Показано, что на восстановленном при 380°C Co-содержащем композиционном катализаторе при 180°C, 2.5 ч⁻¹ и H₂/CH = 3 конверсия C₈₊ компонентов прямогонного бензина составляет 76.8%, а содержание C₅–C₆ алканов, состоящих на 78% из изопарафинов, достигает 61%.

Ключевые слова: прямогонный бензин, катализатор Co(Ni)/HZSM-5/SO₄²⁻-ZrO₂, алканы, интермедиат, изомеризация, диспропорционирование, продукты уплотнения, восстановление, α- и β-связи.

DOI: 10.1134/S0044461819020099

Структурной изомеризации n-алканов C₄–C₇ в литературе уделено большое внимание. В частности, известно, что анион-модифицированные диоксиды циркония способны проводить низкотемпературную изомеризацию индивидуальных алканов C₄–C₇ нормального строения [1–6]. Однако в связи с существенными различиями в реакционной способности этих алканов изомеризационная переработка их смеси затруднена и требует особых, дополнительных технологических решений [7]. Например, промышленная изомеризация C₅–C₆ n-алканов, осуществленная на этом катализаторе, сопровождается деструкцией с образованием нежелательных газообразных алканов

[8]. Кроме того, для стабильного функционирования катализаторов изомеризационной переработки C₅–C₆ n-алканов в них дополнительно вводят элемент VIII Б группы (Pt) и процесс проводят при повышенном давлении водорода [7], а это в свою очередь приводит к восстановлению модифицирующего аниона и необратимой дезактивации катализатора. Отмеченные особенности промышленной изомеризации C₅–C₆ n-алканов с учаюют с участием катализатора — сульфатированного диоксида циркония, то изомеризация n-гептана на стием SO₄²⁻-ZrO₂ каталитических систем делают их непригодными для подобной перера-

ботки смеси C_{8+} алканов, входящих в состав прямогонных бензинов (ПГБ).

Ранее [9] было показано, что в отличие от индивидуальных цеолитных и анион-модифицированных катализаторов композиционные каталитические системы, компонентами которых являются эти катализаторы, проявляют активность в низкотемпературной переработке легкой фракции ПГБ в C_5 – C_6 алканы в основном разветвленного строения, без значительного образования газообразных C_{4-} алканов. С учетом важности C_5 – C_6 алканов как сырья для получения высокооктановых компонентов, требуемых для современных бензинов, представляет интерес исследовать активность подобных композиционных систем в превращении высокотемпературной фракции ПГБ, состоящей в основном из C_{8+} углеводородов. В настоящем сообщении представлены результаты такого исследования с участием композиционных катализаторов HZSM-5/SO₄²⁻-ZrO₂.

Экспериментальная часть

Объектами исследования служили композиционные каталитические (КК) системы, компонентами которых являются сульфатированный диоксид циркония (SZ) и декатионированный цеолит HZSM-5 (M-1; HZSM-5/SZ) или его модифицированные кобальтом (M-11; Co/HZSM-5/SZ) либо никелем (M-20; Ni/HZSM-5/SZ) формы.

Модифицированные цеолитные компоненты синтезированных КК систем готовили путем выдержки декатионированного HZSM-5 (Si/Al = 23) в растворе нитрата кобальта или никеля заданной концентрации в течение 1 сут с последующим выпариванием водной фазы, сушкой при 120 и 350°C (3 ч) и 550°C (5 ч) и обработкой в токе водорода (40 мл·мин⁻¹, 3 ч) при 380°C.

При синтезе SZ компонента КК предварительно получали гель диоксида циркония. Для этого проводили гидролиз ZrOCl₂, взятого в заданном количестве, 25%-ным раствором аммиака при pH 8–9 [10]. С этой целью в раствор, содержащий 10 г ZrOCl₂·8H₂O в 300 мл H₂O, нагретой до 80°C, по каплям при перемешивании добавляли раствор аммиака. Образовавшийся гель 2 ч выдерживали в растворе при указанной выше температуре, затем фильтровали, промывали дистиллированной водой и сушили при 100°C (24 ч). Далее полученный гель Zr(OH)₄ сульфатировали раствором (NH₄)₂SO₄ (с перемешиванием 2 ч), а затем водную часть выпаривали до влажного состояния. По данным элементного анализа (ICP-MS 7700, Agilent Technologies) содержание серы в синтезированном SZ составляло 1.97 мас% в пересчете на серу.

Полученный SZ тщательно перемешивали с порошком соответствующего цеолитного компонента до визуально однородного состояния. Массу сушили при 120°C (3 ч), прокаливали при 600 и 550°C (5 ч), а далее растирали в порошок и гранулировали со связующим — гидрогелем Al₂O₃ в гранулы 1.5 × (3–4) мм и вновь проводили вышеописанную термообработку.

Состав синтезированных КК систем (мас%): SZ — 15, Co или Ni — 0.4, Al₂O₃ — 15, HZSM-5 — остальное.

Анализ дифрактограмм КК систем и их компонентов показал устойчивость цеолитной структуры и повышенное содержание доли тетрагональной фазы диоксида циркония в SZ (≥70%).

В качестве сырья использовали прямогонную бензиновую фракцию состава (мас%): C₄ — 1.0, изо-C₅ — 1.0, н-C₅ — 1.2, изо-C₆ — 5.0, н-C₆ — 3.8, изо-C₇ — 22.0, н-C₇ — 6.5, смесь более высокомолекулярных алканов C₈₊ — 59.5 (н- и изо- — соответственно нормальные и изомерные формы алканов).

Превращение ПГБ изучали на лабораторной каталитической установке проточного типа, снабженной кварцевым реактором. Объем катализатора, загружаемого в реактор, варьировали в пределах 1–5 см³. Перед опытом проводили восстановление КК системы водородом при 380°C (2 ч), кобальтсодержащий образец обрабатывали также при 500°C [M-11(500)].

Превращение ПГБ на КК системах изучали в атмосфере водорода с варьированием температуры, объемной скорости (ОС) подачи ПГБ и линейной скорости водорода.

Для определенности в соотношении H₂/СН за величину СН принят расчетный усредненный молекулярный вес сырья 121 г.

Продукты реакции анализировали методом газовой хроматографии с применением хроматографа AutoSystemXL.

Определение количеств углеродистых отложений (УО), накапливающихся на катализаторах, проводили окислительной обработкой катализатора. Перед проведением опытов установку продували инертным газом (He) 1 ч. Затем катализатор обрабатывали воздухом со скоростью подачи 4 л·ч⁻¹ при 500°C. Количества выделившихся H₂O и CO₂ определяли как гравиметрически (путем их поглощения ангидроном и аскаридом, помещенными в соответствующие капсулы, с последующим взвешиванием этих ампул), так и непосредственно, анализом образовавшихся углеродистых отложений с применением элементного анализатора фирмы TruSpec Micro. Во избежание ошибок воздух, входящий в реактор, также пропускали через трубки, заполненные ангидроном и аскаридом.

Обсуждение результатов

Проведенные исследования показали, что при температурах ниже 220°C отдельные компоненты КК системы не проявляют заметной активности в превращении ПГБ. В отличие от отдельных компонентов контактирование ПГБ с КК системой приводит к существенному изменению распределения углеводородов в катализате. Из данных табл. 1 следует, что содержание более высокомолекулярных парафинов C₇₊ с ростом температуры от 140 до 200°C в катализате монотонно снижается.

Продуктами превращения этих парафинов являются алканы C₆. Распределение этих алканов в катализате имеет сложную температурную зависимость. Как видно из данных табл. 1, в интервале температур 140–160°C в продуктах реакции наблюдается суммарное возрастание C₅–C₆ алканов при практически постоянном соотношении алканов изомерного и нормального строения. С дальнейшим ростом температуры распределение углеводородов в катализате существенно изменяется. Наряду со снижением выхода изо-(C₅–C₆) возрастают выходы н-C₅ и нежелательных C₄ парафинов. Следовательно, повышение выхода н-C₅ и н-C₄ условно можно связать со снижением изомеризующей и ростом крекирующей активности КК системы. Таким образом, температурная зависимость распределения компонентов катализата ПГБ в результате его контактирования с КК системой в целом лимитируется процессами образования углеводородного интермедиата разветвленного строения и его расщеплением (крекингом).

Из данных табл. 1 видно, что рост температуры до T ≥ 180°C приводит к возрастанию крекирующей ак-

тивности КК системы, а содержание нежелательных C₄ алканов при 200°C достигает 60%.

На распределение углеводородов в катализате помимо температуры влияют и другие условия контактирования ПГБ с КК системой.

Как следует из рис. 1, варьирование объемной скорости подачи ПГБ приводит к изменениям конверсии C₈₊ парафинов. В целом с повышением объемной скорости конверсия C₈₊ компонентов ПГБ и выход газообразных алканов C₄ снижаются. Полученные данные показывают, что превращение парафинов C₇ практически не зависит от варьирования объемной скорости, а конверсия C₈₊ сохраняет постоянное значение в интервале скорости 2.0–3.0 ч⁻¹. Таким образом, благодаря сохранению повышенной активности и селективности по C₅–C₆ парафинам и повышенному содержанию полиразветвленного диметилбутана (ДМБ) объемные скорости 2.0–3.0 ч⁻¹ наиболее приемлемы для низкотемпературной переработки ПГБ с участием использованных КК систем.

Изменение соотношения водород–углеводород также является фактором перераспределения углеводородного состава ПГБ в результате контактирования с КК системой.

В табл. 2 представлены результаты влияния варьирования линейной скорости подачи водорода v_{H₂} на превращение ПГБ при его контактировании с КК системой с постоянной ОС (2.5 ч⁻¹). Из данных табл. 2 видно, что увеличение приводит к росту превращения C₇₊ компонентов ПГБ, сопровождающемуся аналогичным повышением выхода нежелательных газообразных алканов. Воздействие v_{H₂} на превращение ПГБ можно разделить на две составляющие.

Таблица 1

Влияние температуры на распределение продуктов превращения ПГБ на катализаторе М-11 (H₂/СН = 3, ОС = 2.5 ч⁻¹)

T, °C	Распределение продуктов реакции, мас%											
	C ₁ –C ₂	C ₃	изо-C ₄	C ₄	изо-C ₅	C ₅	изо-C ₆	ДМБ*	C ₆	изо-C ₇	C ₇	C ₈₊
≤ 120**	—	—	—	1	1	1.2	5	—	3.8	22	6.5	59.5
140	—	—	—	—	24.3	2.8	22.6	23.6	3.6	3.2	5.7	37.8
160	—	—	0.9	—	29.3	4.6	28.7	23.0	3.4	4.5	3.4	25.2
180	0.5	2.2	15.2	3.0	24.6	9.7	23.5	18.5	3.3	2.4	1.8	13.8
200	4.8	25.3	27.5	2.4	8.3	12.4	7.9	0.7	2.8	1.8	0.8	6.0

* Суммарное содержание диметилбутана (ДМБ) в изогексане.

** Соответствует распределению продуктов исходного ПГБ.

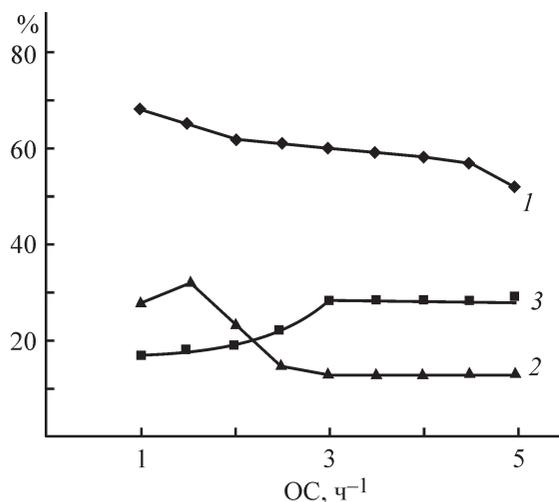


Рис. 1. Влияние объемной скорости подачи ПГБ на его превращение.

Катализатор М-11, температура 180°C.

1 — конверсия C_{8+} , 2 — выход C_{4-} , 3 — содержание ДМБ в изогексане.

Из анализа данных табл. 2 следует, что рост v_{H_2} в интервале 10–30 мл·мин⁻¹ приводит к интенсивному возрастанию конверсии высокомолекулярных компонентов ПГБ и образованию газообразных алканов, т. е. к росту гидрокрекинга. С дальнейшим увеличением $v_{H_2} \geq 40$ мл·мин⁻¹ отмеченные параметры продолжают возрастать, но очень незначительно. Накопление C_5 – C_6 алканов в катализате имеет экстремальный характер и с возрастанием v_{H_2} проходит через максимальное значение, находящееся в интервале 20–30 мл·мин⁻¹.

Повышение температуры до 180°C приводит к интенсификации образования газообразных C_{4-} алканов (табл. 1). Выход этих продуктов зависит также

от v_{H_2} (табл. 2). Повышение выхода C_{4-} в интервале $10 \leq v_{H_2} < 30$ мл·мин⁻¹ свидетельствует о роли водорода как сореактанта гидрокрекинга парафинов C_{7+} , так и газа-носителя, способствующего удалению продуктов из зоны реакции и тем самым ускорению превращения ПГБ. Экстремальная зависимость выхода C_5 – C_6 от v_{H_2} свидетельствует о возможной суперпозиции маршрутов, приводящих к их образованию.

Подробный кинетический анализ полученных данных является предметом отдельного исследования, однако на основе представленных результатов можно предположить, что промежуточными веществами этих маршрутов могут быть как мономолекулярные интермедиаты, образованные с участием высокомолекулярных компонентов ПГБ, так и бимолекулярные, образованные с участием продуктов их превращения. Отметим, что в образовании бимолекулярных промежуточных веществ, возможно, участвуют и C_{4-} продукты гидрокрекинга C_{8+} парафинов [11]. По-видимому, снижению выхода полиразветвленных ДМБ (табл. 2) способствует увеличение скорости выноса из реакционной зоны углеводородов C_{4-} водородом, выполняющим функцию газа-носителя.

Таким образом, представленные данные показывают, что КК система, состоящая из Н-формы цеолита ZSM-5 и сульфатированного диоксида циркония — SZ, способна активировать низкотемпературную переработку ПГБ в C_5 – C_6 алканы с высоким содержанием скелетных изомеров. Поэтому представляет интерес рассмотреть влияние продолжительности эксперимента на функционирование этой системы.

Из рис. 2 видно, что стабильность функционирования КК системы при прочих равных условиях зависит от модифицирования цеолитного компонента гидрирующим элементом и от температуры обработ-

Таблица 2

Влияние водорода на превращение ПГБ на катализаторе М-11(380)
($T = 180^\circ\text{C}$, $ОС = 2.5 \text{ ч}^{-1}$, $\tau = 30 \text{ мин}$)

v_{H_2} , мл·мин ⁻¹	Конверсия C_{8+} , %	Состав катализата, мас%			
		C_{4-}	C_5 – C_6	C_7	C_{8+}
10	58.1	7.9	59.6 (20.6)*	7.6	24.9
20	74.4	13.0	67.2 (19.4)*	4.6	15.2
30	76.1	18.5	63.0 (18.5)*	4.3	14.2
40	77.3	20.9	61.1 (18.0)*	4.2	13.8
50	76.4	21.0	60.8 (17.6)*	4.2	14.0

* Суммарное содержание диметилбутана в изогексане.

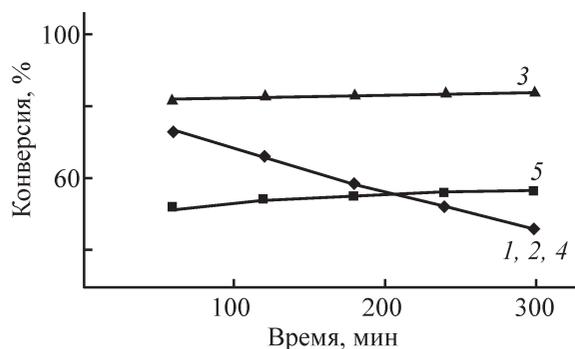


Рис. 2. Влияние температуры восстановления композиционного катализатора водородом на стабильность его функционирования в превращении ПГБ.

$T_{H_2} = 380^\circ C$: 1 — М-1, 2 — М-11, 3 — М-20; $T_{H_2} = 500^\circ C$: 4 — М-1, 5 — М-11.

ки образцов водородом. Следует отметить, что температура предварительной обработки КК системы М-1, не содержащей гидрирующего элемента, водородом в пределах 380–500°C не оказывает воздействия на стабильность его функционирования (рис. 2 кривые 1, 4). Конверсия C₇₊ составляющих ПГБ начинает снижаться примерно после 60-й минуты функционирования КК системы. Введение в цеолитный компонент КК системы в качестве гидрирующего элемента кобальта или никеля оказывает различное воздействие на процесс превращения ПГБ. Если введение никеля в КК систему позволяет стабилизировать работу образца М-20 после его предварительной обработки водородом при 380°C (рис. 2, кривая 3), то аналогичная обработка не оказывает воздействия на кобальтсодержащий контакт М-11. Последний, подвергнутый обработке водородом при 380°C, по

своим каталитическим свойствам идентичен немодифицированному образцу М-1. Однако повышение температуры водородной обработки М-11 до 500°C способствует повышению стабильности функционирования кобальтсодержащего катализатора М-11(500) (рис. 2, кривые 2, 5), но активность кобальтсодержащего КК в этом случае снижается.

Подобное воздействие высокотемпературной, предшествующей обработке водородом М-11, возможно, связано с образованием металлического кобальта и его последующим воздействием на SZ, способствующим частичному восстановлению этого компонента КК системы и тем самым приводящим к аналогичному снижению активности катализатора.

Высокая активность и стабильность никельсодержащего М-20 по сравнению с кобальтсодержащим контактом М-11 может быть связана с легкостью восстановления никеля при 380°C, которая недостаточна для восстановления SZ компонента КК системы. Следует отметить, что превращение ПГБ на М-20 характеризуется высоким выходом нежелательных газообразных алканов и особенно метана. Поэтому никельсодержащий катализатор представлен здесь как пример, подтверждающий необходимость наличия гидрирующего (гидрогенолизирующего) компонента для стабильного функционирования КК системы при низкотемпературной переработке ПГБ.

Причиной дезактивации композиционного катализатора может быть последовательное блокирование его активной поверхности накапливающимися продуктами уплотнения (ПУ). В табл. 3 приведены данные, показывающие накопление ПУ на КК системе, содержащей гидрирующие элементы. Из этих данных видно, что в процессе функционирования

Таблица 3

Накопление продуктов уплотнения на композиционных катализаторах ($T = 180^\circ C$, $H_2/CH = 3$, $OC = 2.5 \text{ ч}^{-1}$)

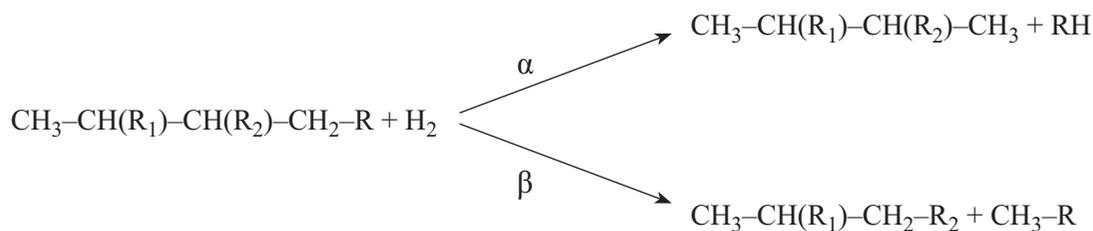
Катализатор	Температура восстановления, °C	Время, ч	ПУ		C	H ₂	H/C
			$\Gamma \cdot \Gamma^{-1}_{кат}$	%			
М-11	380	0.5	0.035	0.88	0.03	0.005	0.17
		1.0	0.052	1.31	0.045	0.007	0.16
		2.0	0.056	1.41	0.048	0.008	0.17
М-11	500	0.5	0.018	0.45	0.015	0.003	0.2
		1.0	0.027	0.67	0.023	0.004	0.17
		2.0	0.04	1.0	0.034	0.006	0.18
М-20	380	3.0	0.022	0.55	0.019	0.003	0.16

кобальтсодержащей КК системы М-11 в течение 1 ч на ней накапливается до 1.31% ПУ. Согласно рис. 2 такое количество накопившихся ПУ соответствует началу снижения активности катализатора М-11. Дальнейшее повышение содержания ПУ на этом образце на 0.10% приводит к снижению конверсии C_{8+} компонентов реактанта более чем на 10%.

В отличие от М-11 накопление ПУ на образцах М-11(500) и М-20 при прочих равных условиях превращения ПГБ далеко от достижения отмеченной критической величины 1.31%, а катализатор сохраняет стабильность в течение более продолжительного времени.

Особый интерес представляет элементный анализ ПУ. Из представленных в табл. 3 данных видно, что отношение Н/С в основном соответствует значениям 0.16–0.18, это в пределах ошибки опыта соответствует формуле $(-CH_2-)_n$ и предполагает, что ПУ по своему строению могут представлять собой насыщенные углеводороды, температура кипения которых превышает температуру экспериментов. Продуктами превращения ПГБ на КК системе, следовательно, являются не только газообразные C_4 и C_5 – C_6 парафины, а также ПУ, представляющие собой более высокомолекулярные углеводороды. Вместе с тем для превращения ПГБ при 140–160°C характерно

отсутствие нежелательных C_4 алканов. С учетом достаточно высокой степени конверсии C_7 и более высокомолекулярных компонентов ПГБ отсутствие в продуктах реакции углеводородов C_4 может быть также следствием предварительного образования бимолекулярных интермедиатов. Наличие в продуктах значительного количества C_5 – C_6 алканов разветвленного строения и ПУ показывает, что эти промежуточные вещества подвергаются скелетной изомеризации и расщеплению (диспропорционированию). Из анализа состава продуктов превращения ПГБ при 140–160°C видно, что отделяющаяся от интермедиатов основная углеводородная цепь состоит из четырех или пяти атомов углерода. Накопление C_5 – C_6 продуктов и изменение их состава связано с селективностью расщепления изомеризованного интермедиата. При прочих равных условиях возможно разложение изомеризованного интермедиата по α - или β -положению по отношению к алкильному заместителю. Как видно из представленной схемы, в случае β -расщепления образующийся алкан разветвленного строения содержит на одну алкильную группу больше, чем продукт α -расщепления. В последнем случае терминальный алкильный заместитель приводит к росту углеводородной цепи продукта на число атомов углерода, выходящих в этот алкильный заместитель:



С ростом температуры, по-видимому, эта закономерность сохраняется, но снижение термодинамической вероятности изомеризации и повышение гидрокрекирующей активности КК систем может приводить к росту выхода C_4 алканов. Здесь необходимо отметить, что при превращении ПГБ образование бимолекулярных интермедиатов в отличие от мономолекулярных существенно зависит от температуры процесса. Например, повышение температуры до 200°C (табл. 1) приводит к резкому росту выхода продуктов C_4 , образование которых связано с гидрокрекингом мономолекулярных интермедиатов C_7 – C_{10} .

В целом механизм образования продуктов превращения ПГБ при 140–160°C по своему характеру близок к механизму изомеризации n - C_4 – n - C_6 алканов на анион-модифицированных диоксидах циркония и

других подобных системах [3, 12]. При этом следует учесть, что если при вышеуказанных температурах n - C_4 – n - C_6 алканы и продукты их превращений легко десорбируются с поверхности катализатора, то ПУ способны интенсивно накапливаться в КК системе и дезактивировать катализатор. Наличие в КК системе кислотного цеолитного компонента, обладающего гидрокрекирующими свойствами, позволяет снизить скорость накопления продуктов уплотнения и тем самым повысить время функционирования катализатора по сравнению с индивидуальным SZ, который ответствен за формирование исходного интермедиата. Таким образом, целенаправленная переработка ПГБ зависит от формирования и последующего расщепления скелетноизомеризованных интермедиатов. Из рис. 1 видно, что с увеличением ОС подачи ПГБ, т. е. с уменьшением времени контакта реактант–ка-

Таблица 4

Превращение ПГБ на катализаторе М-11 (H₂/CH = 1:3, ОС = 2.5 ч⁻¹)

T, °C	Конверсия C ₈₊ , %	Выход Σ(C ₅ –C ₆), мас%	Содержание изо-(C ₅ –C ₆) в C ₅ –C ₆ фракции
140	36.4	53.3	88.0
160	57.6	66	87.8
180	76.8	61.1	78.8
200	90	31.4	51.6

тализатор, выход газообразных алканов снижается, а полиразветвленных диметилбутанов соответственно возрастает. Этот факт показывает, что изомеризация интермедиата предшествует образованию продуктов его расщепления. Из данных табл. 1, обобщенных в табл. 4, видно, что расщеплению интермедиатов, т. е. возрастанию крекирующей активности КК системы, способствует рост температуры процесса. Однако подобное изменение условий превращения нежелательно из-за снижения выхода изо-(C₅–C₆) продуктов. Поэтому для успешного решения проблемы переработки ПГБ при температурах ниже 160°C, благоприятных для формирования и изомеризации интермедиатов, предшествующих образованию целевых продуктов, необходимо повышение крекирующей способности КК систем, и это требует дополнительных исследований в этом направлении.

Выводы

1. C₈₊ компоненты прямогонного бензина на композиционных катализаторах типа М (М — Со или Ni)/HZSM-5/SO₄²⁺-ZrO при 140 ≤ T ≤ 180°C способны подвергаться изомеризационному диспропорционированию с образованием C₅–C₆ алканов в основном разветвленного строения.

2. Процесс низкотемпературной (140–180°C) переработки прямогонного бензина в C₅–C₆ алканы с участием композиционных катализаторов реализуется через последовательное формирование, изомеризацию и расщепление интермедиатов, образованных, как из отдельных C₈₊ компонентов (мономолекулярные) прямогонного бензина так и с участием C₄ продуктов (бимолекулярные).

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда развития науки при Президенте Азербайджанской Республики, грант № EIF-KETPL-2-2015-1(25)-56/20/4.

Список литературы

- [1] Ono Y. // Catal. Today. 2003. V. 81. P. 3–16.
- [2] Кузнецов П. Н., Кузнецова Л. И., Твердохлебова В. П., Санников А. Л. // Хим. технология. 2005. № 2. С. 7–14.
- [3] Wakayama T., Matgughghi H. // J. Mol. Catal. A: Chemical. 2005. V. 239. P. 32–40.
- [4] Смоликов М. Д., Джикая О. В., Затолокина Е. В., Кирьяков Д. И., Белый А. С. // Нефтехимия. 2009. Т. 49. С. 488–495 [Smolikov M. D., Dzhikaya O. V., Zatolokina E. V., Kiryakov D. I., Belyi A. S. // Petrol. Chem. 2009. V. 49. P. 473–480].
- [5] Arribas M. A., Marquez F., Martineza A. // J. Catal. 2000. V. 190. P. 309–319.
- [6] Shurenok V. A., Smolikov M. D., Yablokova S. S., Kiryanov D. I., Belyi A. S., Paukshtis E. A., Leonteva N. N., Gulyaeva T. I., Shilova A. V., Drozdov V. A. // Proc. Eng. 2015. V. 113. P. 62–67.
- [7] Ясакова Е. А., Ситдикова А. В. // Нефтегазовое дело. 2010. <http://www.ogbus.ru>. 19 с. (дата обращения: 10.11.2018).
- [8] Chao K., Wu H., Leu L. // Appl. Catal. A. 1996. V. 143. P. 223–231.
- [9] Агаева С. Б., Алиева А. А., Мамедова М. Т., Искендерова А. А., Иманова А. А., Стариков Р. В., Абасов С. И., Тагиев Д. Б. // Нефтеперераб. и нефтехимия. 2016. № 11. С. 24–27.
- [10] Tatsumi T., Matsuhashi H., Arata K. // Bull. Chem. Soc. Japan. 1996. V. 69. P. 1191–1194.
- [11] Абасов С. И., Агаева С. Б., Мамедова М. Т., Исаева Е. С., Иманова А. А., Искендерова А. А., Алиева А. Э., Зарбалиев Р. П., Тагиев Д. Б. // ЖПХ. 2018. Т. 91. № 6. С. 838–845 [Abasov S. I., Agayeva S. B., Mamedova M. T., Isaeva E. S., Imanova A. A., Iskenderova A. A., Alieva A. A., Zarbaliev P. P., Tagiev D. B. // Russ. J. Appl. Chem. 2018. V. 91. N 6. P. 964–971].
- [12] Adeeva V., Dehaan J. W., Janchen J., Lei G. D., Schunemann V., Vandev L. J. M., Sachtler W. M. H., Vansanten R. A. // J. Catal. 1995. V. 151. P. 364–372.