

Код МРНТИ 31.15.28

А. А. Мельдешов, *А. К. Абишева, М. Р. Жумабаев, Ж. А. Амир
НАО «КазНацЖенПУ» (г. Алматы, Казахстан)

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКООКТАНОВЫХ КОМПОНЕНТОВ БЕНЗИНОВ ИЗ ЛЕГКИХ АЛКАНОВ

Аннотация. Работа посвящена разработке эффективных катализаторов для глубокой переработки нефти и получения высокооктановых компонентов моторных топлив. В качестве носителя использован Кынгракский бентонит, интеркалированный полигидрохсокомплексами алюминия и модифицированный металлами VIII группы. В результате формируется слоисто-столбчатая структура с развитой системой микро- и мезопор, обеспечивающая увеличение удельной поверхности и повышение каталитической активности. Исследовано превращение алканов фракции C_4-C_6 на полученных катализаторах. Установлено влияние содержания модификатора, а также размера и дисперсности частиц активного металла на конверсию и селективность реакций. Показано, что частицы размером 20–60 нм обеспечивают высокую степень превращения, повышенный выход изоалканов и селективность жидких продуктов до 70%.

Ключевые слова: глубокая переработка нефти, катализатор, модифицированный бентонит, изомеризация, изооктан, селективность, конверсия.

Жеңіл алкандардан жоғары октанды бензин компоненттерін алу

Аннотация. Жұмыс мұнайды терең өңдеу тиімділігін арттыруға және жоғары октанды компоненттер алуға арналған катализаторлар әзірлеуге бағытталған. Зерттеуде алюминий полигидрохсокешендерімен модификацияланған және VIII топ металдарымен белсендірілген Кынғырақ бентониті негізіндегі катализаторларда C_4-C_6 алкандарының айналу процестері қарастырылды. Нәтижесінде жоғары меншікті беті бар қабатты-бағаналы кеуекті құрылым қалыптасатыны және оның каталитикалық белсенділікті арттыратыны анықталды. Модификатор мөлшерінің және белсенді металл бөлшектерінің өлшемі мен дисперстілігінің конверсия мен селективтілікке әсері зерттелді. 20–60 нм аралығындағы бөлшектер жоғары тиімділік көрсетіп, изоалкандар шығымын арттырып, сұйық өнімдер бойынша шамамен 70% селективтілікті қамтамасыз етеді.

Түйінді сөздер: мұнайды терең өңдеу, катализатор, модификацияланған бентонит, изомерлеу, изооктан, селективтілік, конверсия.

Obtaining high-octane gasoline components from light alkanes

Abstract. The study focuses on the development of catalysts to enhance deep oil refining and obtain high-octane fuel components. The conversion of C_4-C_6 alkanes was studied over Kyngrak bentonite modified with aluminum polyhydroxy complexes and promoted with Group VIII metals. The modification leads to the formation of a pillared layered structure with developed micro- and mesopores, increasing surface area and catalytic activity. The effects of modifier concentration and active metal particle size and dispersion on conversion and selectivity were examined. It was found that metal particles of 20–60 nm provide high conversion, increased isooctane yield, and liquid product selectivity of about 70%.

Key words: deep oil refining, catalyst, modified bentonite, isooctane, selectivity, conversion.

Введение

Современное развитие транспорта, энергетики и нефтехимической промышленности сопровождается постоянным ростом потребления моторных топлив. Бензин остается одним из основных видов топлива для двигателей внутреннего сгорания, используемых в автомобильном транспорте, авиации и различных промышленных установках. Качество бензина определяется рядом физико-химических характеристик, среди которых ключевое значение имеет октановое число, характеризующее устойчивость топлива к детонации при сгорании в двигателе. Чем выше октановое число, тем выше способность топлива противостоять преждевременному воспламенению и тем стабильнее и эффективнее работает двигатель.

В процессе работы двигателя внутреннего сгорания топливно-воздушная смесь подвергается высокому давлению и температуре. При использовании топлива с низким октановым числом возникает явление детонации (engine knocking) – преждевременное самовоспламенение смеси в цилиндре двигателя. Это приводит к образованию ударных волн, которые могут вызвать серьезные повреждения поршней, цилиндров и клапанного механизма. Поэтому современные высококомпрессионные двигатели требуют применения бензинов с повышенным октановым числом.

На протяжении длительного времени для повышения октанового числа бензинов применялись специальные антидетонационные присадки. Наиболее известной из них являлся тетраэтилсвинец, который широко использовался в нефтеперерабатывающей промышленности в XX веке. Однако использование свинцовых присадок оказалось крайне вредным для окружающей среды и здоровья чело-

века. В результате постепенного отказа от этилированного бензина в большинстве стран мира были получены значительные экологические и социальные выгоды.

Отказ от свинцовых антидетонационных присадок поставил перед нефтеперерабатывающей промышленностью новую задачу – разработку экологически безопасных технологий получения высокооктановых компонентов бензинов. Одним из перспективных направлений является каталитическое преобразование легких алканов, которые образуются в больших количествах при переработке нефти и природного газа. К таким углеводородам относятся метан, этан, пропан и бутан. Несмотря на значительные объемы их добычи, многие из этих компонентов имеют относительно низкую стоимость и не всегда эффективно используются. Их превращение в высокооктановые компоненты бензинов позволяет значительно повысить эффективность использования углеводородного сырья.

Актуальность данной проблемы также обусловлена необходимостью повышения энергетической эффективности двигателей и снижения вредных выбросов. Исследования показывают, что использование бензинов с высоким октановым числом способствует более полному и стабильному сгоранию топлива, что приводит к уменьшению выбросов углеводородов, оксида углерода и углекислого газа.

В условиях современного развития нефтеперерабатывающей промышленности большое значение имеют процессы изомеризации, алкилирования и каталитического реформинга, позволяющие получать высокооктановые изопарафиновые и ароматические углеводороды. Например, в процессе алкилирования изобутан взаимодействует с легкими олефинами (пропиленом и бутиленом), образуя

изопарафины с октановым числом около 98–100, которые являются ценными компонентами бензинов.

Особое внимание в современных исследованиях уделяется также разработке новых катализаторов и методов химической переработки легких алканов. Эти процессы позволяют получать высокооктановые компоненты непосредственно из доступного сырья, повышая экономическую эффективность нефтепереработки и снижая зависимость от дорогостоящих присадок.

Таким образом, разработка и совершенствование технологий получения высокооктановых компонентов бензинов из легких алканов является актуальной научной и технологической задачей. Решение этой проблемы способствует более рациональному использованию углеводородных ресурсов, повышению эффективности двигателей внутреннего сгорания и снижению негативного воздействия транспорта на окружающую среду. В связи с этим исследования в данной области имеют большое значение для развития современной нефтехимической промышленности и энергетики.

Современные тенденции развития нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности направлены на повышение глубины переработки нефти, увеличение выхода моторных топлив высокого качества и ужесточение экологических характеристик бензинов. Одним из ключевых показателей качества бензина является октановое число, определяющее его детонационную стойкость. В условиях ограниченных ресурсов ароматических углеводородов и ужесточения экологических требований особую актуальность приобретает разработка эффективных методов получения высокооктановых компонентов из доступного и дешевого углеводородного сырья – легких алканов фракции C_4 – C_6 .

Легкие n -алканы (n -бутан, n -пентан, n -гексан), входящие в состав попутных и нефтезаводских газов, обладают сравнительно низким октановым числом, однако при изомеризации способны превращаться в разветвленные изомеры, отличающиеся высокой детонационной стойкостью. Таким образом, каталитическая изомеризация легких алканов представляет собой перспективное направление получения высокооктановых компонентов бензинов без существенного увеличения содержания ароматических соединений. Эффективность процессов изомеризации во многом определяется природой катализатора, его кислотно-основными и структурными характеристиками, дисперсностью и природой активной металлической фазы. В последние годы значительный интерес вызывают модифицированные слоистые алюмосиликаты, в частности бентониты, структура которых может быть целенаправленно изменена путем интеркалирования полигидроксокомплексами металлов с образованием слоисто-столбчатых (pillared) структур. Такая модификация обеспечивает увеличение межслоевого расстояния, формирование развитой пористой структуры и повышение термостабильности носителя, что создает благоприятные условия для формирования высокодисперсной металлической фазы.

Особое значение имеет использование металлов VIII группы в качестве активных центров гидрирования-дегидрирования, обеспечивающих протекание изомеризаци-

онных превращений по бифункциональному механизму. При этом размер частиц нанесенного металла существенно влияет на каталитическую активность и селективность процесса, что обуславливает необходимость комплексного исследования влияния дисперсности металлической фазы на превращение C_4 – C_6 алканов.

Методы исследования и результаты

В работе исследованы процессы каталитического превращения легких алканов состава C_4 – C_6 в присутствии модифицированных бентонитовых катализаторов, содержащих металлы VIII группы периодической системы. В качестве основы катализаторов использовали природный бентонит, подвергнутый предварительной подготовке, включавшей сушку, измельчение и термическую обработку.

Модификацию бентонита осуществляли методом ионного обмена с использованием полигидроксокомплексов металлов. В межслоевое пространство алюмосиликата вводили олигомерные гидроксокаатионы, обеспечивающие формирование слоисто-столбчатой структуры. После проведения ионного обмена образцы подвергали сушке и прокаливанию для фиксации модифицирующих компонентов и стабилизации пористой структуры материала.

На следующем этапе на поверхность модифицированного носителя наносили активные компоненты – металлы VIII группы, обеспечивающие каталитическую активность в реакциях превращения углеводородов. Полученные катализаторы исследовали с применением физико-химических методов анализа для определения структуры, текстурных характеристик и состояния активных центров. Каталитические испытания проводили в проточном реакторе в условиях повышенных температур. В качестве сырья использовали легкие алканы состава C_4 – C_6 . Анализ состава исходных веществ и продуктов реакции осуществляли методом газовой хроматографии. Оценку эффективности катализаторов проводили по показателям конверсии исходных углеводородов, селективности образования ароматических соединений и выходу алкилбензинов.

Установлено, что модификация бентонита полигидроксокомплексами металлов приводит к существенному изменению структуры алюмосиликата. После термической обработки формировалась слоисто-столбчатая структура с развитой системой пор и увеличенной удельной поверхностью по сравнению с исходным природным материалом. Введение металлов VIII группы способствовало повышению каталитической активности полученных материалов в реакциях превращения легких алканов. Исследования показали, что в присутствии модифицированных катализаторов происходят процессы дегидрирования, циклизации и ароматизации углеводородов с образованием ароматических соединений, преимущественно алкилбензинов.

Наиболее высокие показатели активности наблюдались для катализаторов, обладающих развитой пористой структурой и равномерным распределением активных металлических центров. Установлено, что увеличение доступно-

сти активных центров способствует росту конверсии исходных алканов и повышению селективности образования высокооктановых компонентов бензина.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения модифицированных бентонитовых катализаторов для процессов переработки легких углеводородов нефтяного и газового происхождения. Разработанные каталитические системы могут быть использованы для получения высокооктановых компонентов моторных топлив и ценных нефтехимических продуктов.

В качестве модифицирующего агента в данной работе были использованы гидроксокомплексы хлорида алюминия. Получение гидроксокомплексов проводили путем постепенного добавления раствора гидроксида алюминия к раствору хлорида алюминия при температуре 363 К при постоянном перемешивании. Процесс осуществлялся в условиях контролируемой кислотности среды при значении pH около 3 [1, 2], что обеспечивало образование устойчивых полигидроксокомплексов алюминия. Полученные гидроксокомплексы затем использовали для модификации структуры бентонитовых глин, что позволяло получать каталитические системы с улучшенными текстурными и каталитическими характеристиками.

Восстановление катализаторов и исследование процессов превращения алканов C_4 – C_6 проводили на лабораторной установке проточного типа с неподвижным слоем катализатора, предложенной исследователями Шполянским и Лихачевым [3]. Данная установка широко применяется для изучения каталитических процессов переработки углеводородов, поскольку позволяет проводить эксперименты в контролируемых условиях и получать достоверные данные о каталитической активности исследуемых материалов. Схема установки превращения легких углеводородов приведена на рис. 1.

Схема лабораторной установки каталитического превращения легких углеводородов включает три основные функциональные части. Первая часть установки предназначена для подачи исходной газовой смеси и включает баллоны со сжатыми газами, такими как азот и водород, а также систему дозированной подачи жидких компонентов и воздуха. Использование азота позволяет создавать инертную среду и предотвращать нежелательные побочные реакции, а водород применяется для восстановления катализаторов перед проведением каталитических экспериментов.

Вторая часть установки представляет собой реакционный блок, состоящий из реактора и трубчатой печи. Реактор содержит неподвижный слой катализатора, через который пропускается реакционная смесь углеводородов. Трубчатая печь обеспечивает поддержание необходимой температуры реакции и позволяет проводить процессы каталитического превращения в широком диапазоне температур. Контроль температуры осуществляется с помощью термомпар и регулирующих устройств.

Третья часть установки предназначена для сбора и анализа продуктов реакции. Она включает приемник конденсата, в котором собираются жидкие продукты превращения, и газометр для измерения объема образующихся газообразных продуктов.

При изменении концентрации полгроксокомплекса с 1,0 до 18,0 ммоль/г базального отражения изменяется от 13,0 до 19,0 (Å). При этом зависимость степени раздвижений пакетов от количества введенного гидроксокомплекса имеет экстремальный характер. Так, для образцов, модифицированных введением полигидроксокомплексами алюминия в количестве ~ 10 ммоль/г наблюдается максимальное значение межслоевого расстояния равной 19,0 (Å).

На основании данных рентгенового анализа можно заключить о том, что при введении в состав Кынгракского бентонита полигидрооксокатиона алюминия происходит раздвижение пакетов бентонита, о чем свидетельствует изменения первого базального отражения (d_{001}) с (Å) (таблица 1).

Таблица 1

Адсорбция и некоторые физико-химические характеристики Кынгракского бентонита после модифицирования

Кесте 1

Модификациядан кейінгі Кынграк бентонитінің адсорбциясы және кейбір физика-химиялық сипаттамалары

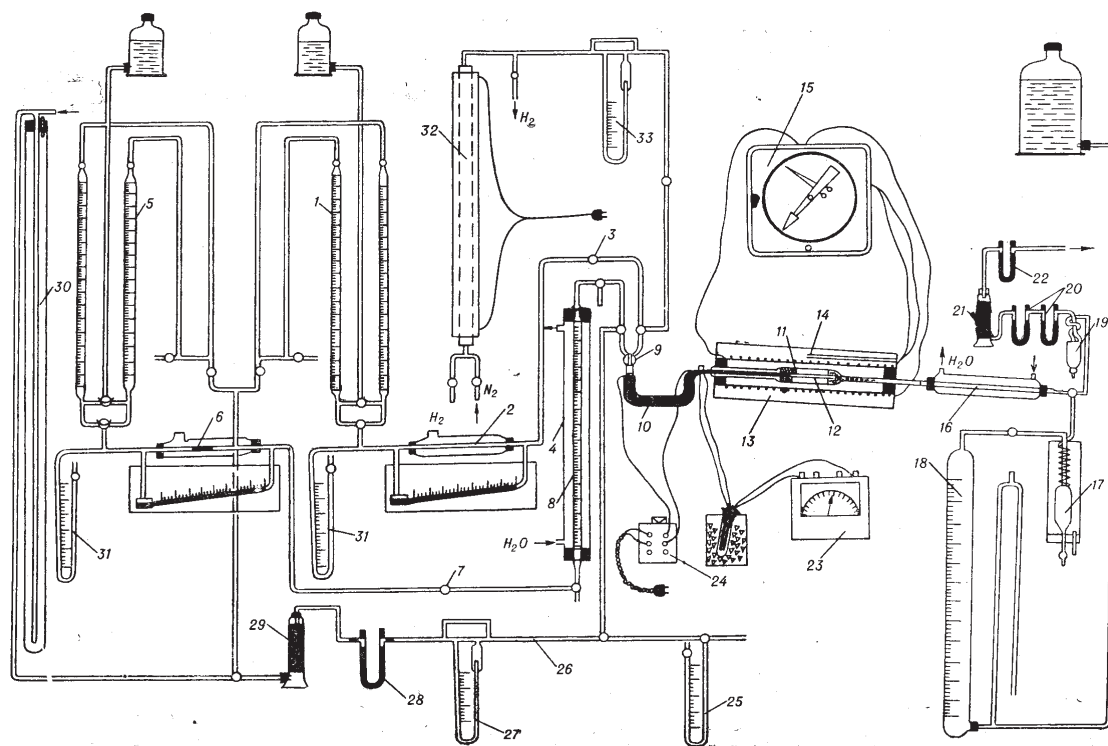
Table 1

Adsorption and some physicochemical characteristics of Kyngrak bentonite after modification

№ образца	$C_{ПГК}$ моль/г	pH системы	d_{001} , (Å)	$S_{уд}$, м ² /г
1	-	9,5	9,0	70
2	1,0	3,0	13,0	200
3	2,0	2,9	14,0	210
4	4,0	2,8	15,0	220
5	6,0	2,7	15,0	240
6	8,0	2,7	16,0	250
7	10,0	2,6	16,0	260
8	12,0	2,6	18,0	280
9	14,0	2,5	18,0	300
10	16,0	2,4	19,0	310
11	18,0	2,3	19,0	310
12	20,0	2,3	17,0	310
13	22,0	2,2	15,0	300
14	24,0	2,2	14,0	300

Из таблицы 1 следует, что с увеличением концентрации ПГК Al (III) вызывает понижение pH системы, которое означает уменьшение концентрации гидроксил ионов.

В следующей серии опытов изучали превращения C_4 – C_6 алканов на катализаторах восстановленных различной скоростью восстановления, т. е. представляло интерес влияние размера частиц активного металла на превращение n-алканов. Результаты экспериментальных данных сведены в таблицы 2–4.



1, 5 – градуированные бюретки с водой; 2, 6 – дифманометры для замера расхода жидких продуктов; 3, 7 – краны для регулировки подачи воды и углеводорода; 4 – водяной холодильник; 8 – градуированная бюретка; 9 – головка испарителя с капиллярами; 10 – испаритель; 11 – реактор кварцевый; 12 – карман для термопары, регистрирующей температуру в реакционной зоне; 13 – электрическая печь; 14 – термопара; 15 – терморегулятор ЭПД-12; 16 – водяной холодильник; 17 – приемник для углеводородов; 18 – цилиндрический газометр; 19 – приемник для воды во время регенерации; 20 – U-образные трубки с хлористым кальцием; 21 – колонка с окисью алюминия; 22 – U-образная трубка с аскаритом; 23 – гальванометр; 24 – ЛАТР для регулировки температуры в испарителе; 25 – ртутный манометр; 26 – воздушная линия; 27 – реометр для замера расхода воздуха; 28 – U-образная трубка с гранулированным едким калием; 29 – колонка с активированным углем для очистки воздуха от загрязнений; 30 – моностаб; 31 – ртутный манометр; 32 – электрическая печь для очистки азота от кислорода; 33 – реометр для замера расхода азота и других газов

1, 5 – сумен толтырылған градуирленген бюреткалар; 2, 6 – сұйық өнімдердің шығынын өлшеуге арналған дифференциалды манометрлер; 3, 7 – су мен көмірсутекті беру мөлшерін реттеуге арналған крандар; 4 – суытқыш-конденсатор; 8 – градуирленген бюретка; 9 – капиллярлары бар буландырғыш басы; 10 – буландырғыш; 11 – кварцты реактор; 12 – реакциялық аймақтағы температураны тіркейтін терможұпқа арналған қалташа; 13 – электр пеші; 14 – терможұп; 15 – ЭПД-12 термореттегіші; 16 – суытқыш-конденсатор; 17 – көмірсутектерді жинауға арналған қабылдағыш; 18 – цилиндрлі газометр; 19 – регенерация кезінде суды жинауға арналған қабылдағыш; 20 – кальций хлоридімен толтырылған U-тәрізді түтіктер; 21 – алюминий оксидімен толтырылған колонка; 22 – аскаритпен толтырылған U-тәрізді түтік; 23 – гальванометр; 24 – буландырғыштағы температураны реттеуге арналған ЛАТР (зертханалық автотрансформатор); 25 – сынапты манометр; 26 – ауа желісі; 27 – ауа шығынын өлшеуге арналған реометр; 28 – түйіршіктелген күйдіргіш калиймен толтырылған U-тәрізді түтік; 29 – ауаны ластағыштардан тазартуға арналған белсендірілген көмірлі колонка; 30 – моностаб; 31 – сынапты манометр; 32 – азотты оттектен тазартуға арналған электр пеші; 33 – азот пен басқа газдардың шығынын өлшеуге арналған реометр

1, 5 – graduated burettes filled with water; 2, 6 – differential manometers for measuring the flow rate of liquid products; 3, 7 – valves for regulating the supply of water and hydrocarbons; 4 – water condenser; 8 – graduated burette; 9 – evaporator head with capillaries; 10 – evaporator; 11 – quartz reactor; 12 – thermocouple well for monitoring the temperature in the reaction zone; 13 – electric furnace; 14 – thermocouple; 15 – EPD-12 temperature controller; 16 – water condenser; 17 – hydrocarbon receiver; 18 – cylindrical gasometer; 19 – water receiver used during regeneration; 20 – U-shaped tubes filled with calcium chloride; 21 – alumina column; 22 – U-shaped tube filled with Ascarite; 23 – galvanometer; 24 – variable autotransformer (Variac) for temperature control in the evaporator; 25 – mercury manometer; 26 – air supply line; 27 – rotameter for measuring air flow rate; 28 – U-shaped tube filled with granular caustic potash; 29 – activated carbon column for purifying air from contaminants; 30 – monostat; 31 – mercury manometer; 32 – electric furnace for removing oxygen from nitrogen; 33 – rotameter for measuring the flow rates of nitrogen and other gases

Рис. 1. Схема установки превращения легких углеводородов.
Сурет 1. Жеңіл көмірсутекті конверсиялық қондырғының схемасы.
Figure 1. Scheme of the light hydrocarbon conversion plant.

Таблица 2

Влияние средних размеров частиц металла на выход жидких углеводородов изостроения

Кесте 2

Металл бөлшектерінің орташа мөлшерінің изокұрылымның сұйық көмірсутектерінің шығымына әсері

Table 2

The influence of the average size of metal particles on the yield of liquid hydrocarbons of the isostructure

Катализатор	d, (Å)	Конверсия, %	$S_{\text{жидк.}}, \%$	Состав жидкого продукта, масс. %	
				изооктан	другие
1,0% Rh/КБОК	15–20	50	60	30	70
	20–30	60	70	40	60
	40–60	66	70	40	60
	70–90	64	50	30	70
	90–120	55	40	25	75
1,0% Ru/ КБОК	15–20	45	50	20	80
	25–40	56	65	40	60
	50–80	60	60	35	65
	90–110	60	40	25	75
	120–140	50	30	20	80
1,0% Pd/ КБОК	10–20	20	30	40	60
	20–30	27	40	50	50
	40–60	30	35	40	60
	70–80	35	20	30	70
	90–110	30	10	20	80
1,0% Pt/ КБОК	10–20	20	25	35	65
	20–30	26	30	45	55
	50–60	30	30	40	60
	70–90	30	25	35	65
	90–120	25	20	20	80

Таблица 3

Влияние средних размеров частиц металла на выход жидких алканов изостроения

Кесте 3

Металл бөлшектерінің орташа өлшемдерінің изокұрылымдағы сұйық алкандардың шығымына әсері

Table 3

The influence of average metal particle sizes on the yield of liquid alkanes of isostructure

Катализатор	d, (Å)	Конверсия, %	$S_{\text{жидк.}}, \%$	Состав жидких продуктов, % масс.		
				изооктан	изопентан	другие
1,0% Rh/КБОК	10–20	65	60	40	20	40
	20–30	80	70	55	30	15
	40–60	80	60	60	30	10
	70–90	80	55	40	25	35
	90–120	75	45	35	20	45
1,0% Ru/ КБОК	15–20	60	50	40	30	30
	25–40	70	65	50	35	15
	50–80	75	70	50	30	20
	90–110	80	40	40	30	30
	120–140	70	35	35	25	40
1,0% Pd/ КБОК	10–20	26	40	15	20	65
	20–30	36	50	20	30	50
	40–60	40	50	20	30	50
	70–80	40	30	10	20	70
	90–110	35	20	10	15	75
1,0% Pt/ КБОК	20–30	32	40	30	40	30
	50–60	34	40	20	40	40
	70–90	33	30	15	30	55
	90–120	30	25	15	20	65

Таблица 4

Влияние средних размеров частиц металла на выход жидких алканов изостроения

Кесте 4

Металл бөлшектерінің орташа мөлшерінің изокұрылымның сұйық алкандарының шығымына әсері

Table 4

The influence of the average size of metal particles on the yield of liquid alkanes of the isostructure

Катализатор	d, (Å)	Конверсия, %	$S_{\text{жидк.}}$, %	Состав жидких продуктов, % масс.		
				изооктан	изопентан	другие
1,0% Rh/КБОК	10–20	60	50	40	10	50
	20–30	75	70	50	20	30
	40–60	80	70	50	30	20
	70–90	80	50	45	20	35
	90–120	70	45	30	15	55
1,0% Ru/ КБОК	15–20	50	45	30	15	55
	25–40	60	50	35	25	40
	50–80	70	60	40	30	30
	90–110	75	40	40	30	30
	120–140	65	35	30	20	50
1,0% Pd/ КБОК	10–20	25	30	10	20	70
	20–30	34	45	15	30	55
	40–60	36	40	15	40	45
	70–80	36	30	15	40	55
	90–110	34	15	10	15	75
1,0% Pt/ КБОК	10–20	20	30	15	25	60
	20–30	30	50	20	35	45
	50–60	34	50	20	45	35
	70–90	35	40	15	40	45
	90–120	30	35	12	18	70

Из данных таблиц 2–4 следует, что конверсия н-алкана проходит через максимум. Оптимальным средним размером частиц является 20–60 Å. На 1,0% Rh/КБОК при среднем размере частиц 20–30 Å конверсия н-бутана, н-пентана и н-гексана составляет 56,0; 70,0 и 80,0% масс. соответственно. При этом, селективность по образованию жидких продуктов приблизительно остается постоянной 70%. Выход изооктана возрастает от н-бутана к н-гексану и изменяется от 40 до 55% масс.

С укрупнением диаметра частиц конверсия н-алканов также проходит через максимум [4–6]. На 1,0% Rh/КБОК наибольшая конверсия н-бутана наблюдается при среднем размере частиц 20–90 Å и составляет 60–64% масс. При среднем размере частиц родия 90–120 Å, конверсия н-бутана составляет 55% масс., т. е. идет уменьшение превращения н-бутана. В случае н-пентана при среднем размере частиц родия 20–90 Å, конверсия углеводорода составляет 75–80% и дальнейшее укрупнение средних размеров частиц 90–120 Å приводит к уменьшению конверсии до 70% масс.

В [7–10] отмечается, что удельная каталитическая активность (УКА) определяется химическим составом ката-

лизатора и УКА постоянна для частиц металла с размером ≥ 30 Å. Для кристаллов меньше 30 Å наблюдаются отклонения как в сторону увеличения УКА, так и ее уменьшения.

Заключение

На основании результатов рентгеноструктурного анализа установлено, что введение в состав Кынгракского бентонита полигидроксокаатионов алюминия приводит к существенным изменениям его кристаллической структуры. В частности, наблюдается раздвижение межслоевых пакетов бентонита, что подтверждается изменением положения первого базального отражения ($d001$). Данный эффект свидетельствует о формировании интеркалированной, а в дальнейшем и слоисто-столбчатой структуры материала, сопровождающейся увеличением межслоевого расстояния. Подобные структурные преобразования способствуют формированию развитой пористой структуры и увеличению удельной поверхности катализатора, что является важным фактором повышения его каталитической активности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чоркендорф И., Наймантсведрайт Х. Современный катализ и химическая кинетика: научное издание. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2013. – 504 с. (на русском языке)

2. Кравцов А. В., Ивашкина Е. Н., Юрьев Е. М. Теоретические основы каталитических процессов переработки нефти и газа: учебное пособие. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. – 144 с. (на русском языке)
3. Gonsior N. Ионные жидкости. Современный метод синтеза, полимеризации, характеристики и применения. – Дюссельдорф, 2010. – 152 с. (на английском языке)
4. Маликов И. В., Завалинская И. С., Ясьян Ю. П. Исследование каталитической активности иммобилизованных ионных жидкостей в реакции изомеризации *n*-гексана // Технологии нефти и газа. – 2015. – № 1. – С. 33–37 (на русском языке)
5. Маликов И. В., Завалинская И. С., Ясьян Ю. П. Исследование превращений углеводородов C5-C6 в реакции изомеризации в присутствии катализаторов на основе иммобилизованной ионной жидкости // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2. – Ч. 5. – С. 935–939 (на русском языке)
6. Маликов И. В., Завалинская И. С., Ясьян Ю. П. Изомеризация легкой бензиновой фракции на иммобилизованной ионной жидкости // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2015. – № 4. – С. 25–28 (на русском языке)
7. Маликов И. В., Завалинская И. С., Ясьян Ю. П. Каталитические свойства нанесенных ионных жидкостей на основе хлорида алюминия в изомеризации *n*-гексана // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2015. – № 6. – С. 19–23 (на русском языке)
8. Мельдешов А. А., Абишева А. К., Матаев М. М. Перспективы эффективного использования попутного нефтяного газа и легких углеводородов // Горный журнал Казахстана. – 2024. – № 10. – С. 46–52 (на русском языке)
9. Изомеризация эндо-тетрагидродициклопентадиена на ионно-жидкостных катализаторах на основе хлоралюмината, нанесенного на глину / M. Y. Huang [и др.] // Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. – 2010. – Т. 315. – С. 69–75 (на английском языке)
10. Forstiere A., Olivier-Bourbigou H., Saussine L. Олигомеризация моноолефинов гомогенными катализаторами // Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP. – 2009. – Т. 64. – № 6. – С. 649–667 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Чоркендорф И., Найманцведрайт Х. Қазіргі катализ және химиялық кинетика: ғылыми басылым. – Долгопрудный: «Интеллект» баспасы, 2013. – 504 б. (орыс тілінде)
2. Кравцов А. В., Ивашкина Е. Н., Юрьев Е. М. Мұнай мен газды өңдеудегі каталикалық процестердің теориялық негіздері: оқу құралы. – Томск: Томск политехникалық университетінің баспасы, 2010. – 144 б. (орыс тілінде)
3. Gonsior N. Иондық сұйықтықтар. Синтездеудің, полимерленудің, сипаттаудың және қолданудың заманауи әдістері. – Дюссельдорф, 2010. – 152 б. (ағылшын тілінде)
4. Маликов И. В., Завалинская И. С., Ясьян Ю. П. *N*-гексанның изомерлену реакциясындағы иммобилизацияланған иондық сұйықтықтардың каталикалық белсенділігін зерттеу // Мұнай және газ технологиялары. – 2015. – № 1. – Б. 33–37 (орыс тілінде)
5. Маликов И. В., Завалинская И. С., Ясьян Ю. П. Иммобилизацияланған иондық сұйықтық негізіндегі катализаторлардың қатысуымен C5-C6 көмірсутектерінің изомерлену реакцияларындағы түрленуін зерттеу // Іргелі зерттеулер. – 2015. – № 2. – Бөл. 5. – Б. 935–939 (орыс тілінде)
6. Маликов И. В., Завалинская И. С., Ясьян Ю. П. Жеңіл бензин фракциясының иммобилизацияланған иондық сұйықтыққа изомерленуі // Мұнай өнімдерінің әлемі. Мұнай компанияларының бюллетені. – 2015. – № 4. – Б. 25–28 (орыс тілінде)
7. Маликов И. В., Завалинская И. С., Ясьян Ю. П. *N*-гексанның изомерленуіндегі алюминий хлориді негізіндегі тірек иондық сұйықтықтардың каталикалық қасиеттері // Мұнай өңдеу және мұнай химиясы. – 2015. – № 6. – Б. 19–23 (орыс тілінде)
8. Мельдешов А. А., Абишева А. К., Матаев М. М. Глосне мұнай газы мен жеңіл көмірсутектерді тиімді пайдаланудың болашағы // Қазақстанның тау-кен журналы. – 2024. – № 10. – Б. 46–52 (орыс тілінде)
9. Эндо-тетрагидродициклопентадиеннің сазды қолдайтын хлоралюминат иондық сұйық катализаторлар арқылы изомерленуі / M. Y. Huang [және т. б.] // Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. – 2010. – Т. 315. – Б. 69–75 (ағылшын тілінде)
10. Forstiere A., Olivier-Bourbigou H., Saussine L. Біртекті катализаторлар арқылы моноолефиндердің олигомерленуі // Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP. – 2009. – Т. 64. – № 6. – Б. 649–667 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Chorkendorff I., Niemantsverdriet H. *Sovremennyyi kataliz i khimicheskaya kinetika: nauchnoe izdanie [Modern Catalysis and Chemical Kinetics]*. Dolgoprudny: Izdatel'skii Dom «Intellect», 2013. – 504 p. (in Russian)

2. Kravtsov A. V., Ivashkina E. N., Yuryev E. M. *Teoreticheskie osnovy kataliticheskikh protsessov pererabotki nefi i gaza: uchebnoe posobie* [Theoretical Foundations of Catalytic Processes in Oil and Gas Processing: textbook]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2010. – 144 p. (in Russian)
3. Gonsior N. *Ionic Liquids: Modern Methods of Synthesis, Polymerization, Characterization and Application*. – Düsseldorf, 2010. – 152 p. (in English)
4. Malikov I. V., Zavalinskaya I. S., Yasyan Yu. P. *Issledovanie kataliticheskoi aktivnosti immobilizovannykh ionnykh zhidkostei v reaktsii izomerizatsii n-geksana* [Study of the catalytic activity of immobilized ionic liquids in the isomerization reaction of n-hexane]. *Tekhnologii nefi i gaza* [Oil and Gas Technologies]. – 2015. – No. 1. – P. 33–37 (in Russian)
5. Malikov I. V., Zavalinskaya I. S., Yasyan Yu. P. *Issledovanie prevrashchenii uglevodorodov S5-S6 v reaktsii izomerizatsii v prisutstvii katalizatorov na osnove immobilizovannoi ionnoi zhidkosti* [Study of the transformations of C5-C6 hydrocarbons in isomerization reactions in the presence of catalysts based on immobilized ionic liquid]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research]. – 2015. – No. 2. – Part 5. – P. 935–939 (in Russian)
6. Malikov I. V., Zavalinskaya I. S., Yasyan Yu. P. *Izomerizatsiya legkoi benzinovoi fraktsii na immobilizovannoi ionnoi zhidkosti* [Isomerization of light gasoline fraction on an immobilized ionic liquid]. *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii* [World of petroleum products. Bulletin of oil companies]. – 2015. – No. 4. – P. 25–28 (in Russian)
7. Malikov I. V., Zavalinskaya I. S., Yasyan Yu. P. *Kataliticheskie svoystva nanesennykh ionnykh zhidkostei na osnove khlorida alyuminiya v izomerizatsii n-geksana* [Catalytic properties of supported ionic liquids based on aluminum chloride in the isomerization of n-hexane]. *Neftepererabotka i neftekhimiya* [Oil refining and petrochemistry]. – 2015. – No. 6. – P. 19–23 (in Russian)
8. Meldeshov A. A., Abisheva A. K., Mataev M. M. *Perspektivy effektivnogo ispol'zovaniya poputnogo neftyanogo gaza i legkikh uglevodorodov* [Prospects for the Efficient Utilization of Associated Petroleum Gas and Light Hydrocarbons]. *Gornyi zhurnal Kazakhstana* [Mining Journal of Kazakhstan]. – 2024. – No. 10. – P. 46–52 (in Russian)
9. *Isomerization of endo-tetrahydrodicyclopentadiene over clay-supported chloroaluminate ionic liquid catalysts* / M. Y. Huang et al. // *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. – 2010. – Vol. 315. – P. 69–75 (in English)
10. Forstiere A., Olivier-Bourbigou H., Saussine L. *Oligomerization of Monoolefins by Homogeneous Catalysts* // *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*. – 2009. – Vol. 64. – No. 6. – P. 649–667 (in English)

Сведения об авторах:

Мельдешов А. А., докт. хим. наук., доцент кафедры «Химия», КазНацЖенПУ (г. Алматы, Казахстан), a.meldeshov@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-9223-1409>

Абишева А. К., канд. хим. наук., доцент кафедры «Химия», КазНацЖенПУ (г. Алматы, Казахстан), abisheva.ak@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-0981-1167>

Жумабаев М. Р., Ph.D, ст. преподаватель кафедры «Химия», КазНацЖенПУ (г. Алматы, Казахстан), Murat_1977@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4071-111X>

Амир Ж. А., Ph.D, ст. преподаватель кафедры «Химия», КазНацЖенПУ (г. Алматы, Казахстан), amirjanibek@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6255-3271>

Авторлар туралы мәліметтер:

Мелдешов А. А., химия ғылымдарының докторы, доцент «Химия» кафедрасы, Қазақ Ұлттық Қыздар Педагогикалық Университеті (Алматы қ., Қазақстан)

Абишева А. К., химия ғылымдарының кандидаты, доцент «Химия» кафедрасы, Қазақ Ұлттық Қыздар Педагогикалық Университеті (Алматы қ., Қазақстан)

Жумабаев М. Р., Ph.D, Қазақ Ұлттық Қыздар Педагогикалық Университеті, «Химия» кафедрасы, аға оқытушы (Алматы қ., Қазақстан)

Амир Ж. А., Ph.D, «Химия» кафедрасының аға оқытушысы, Қазақ Ұлттық Қыздар Педагогикалық Университеті (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Meldeshov A. A., Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Chemistry, KazNational Women's Pedagogical University (Almaty, Kazakhstan)

Abisheva A. K., Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Chemistry, KazNational Women's Pedagogical University (Almaty, Kazakhstan)

Zhumabayev M. R., Ph.D, Department of Chemistry, KazNational Women's Pedagogical University (Almaty, Kazakhstan), Department of chemistry, senior lector (Almaty, Kazakhstan)

Amir Zh. A., Ph.D, Senior Lecturer, Department of Chemistry, KazNational Women's Pedagogical University (Almaty, Kazakhstan)