

ГИДРОДЕЦИКЛИЗАЦИЯ НАФТЕНОВЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ИРИДИЕВЫХ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИХ КАТАЛИЗАТОРАХ

© 2023 г. Л. Г. Мамян¹, А. А. Садовников¹, О. В. Арапова¹, А. Л. Максимов¹, Е. Р. Наранов^{1,*}

¹ Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва, 119991 Россия

*E-mail: naranov@ips.ac.ru

Поступила в редакцию 30 августа 2023 г.

После доработки 7 ноября 2023 г.

Принята к публикации 4 декабря 2023 г.

Исследован процесс гидродециклизации декалина на цеолитсодержащих катализаторах. Полученные катализаторы охарактеризованы комплексом физико-химических методов анализа (ПЭМ, РЭМ, низкотемпературная адсорбция–десорбция азота, ²⁷Al ЯМР, РФЭС); установлено, что структура цеолита существенным образом влияет на процесс гидродециклизации углеводородов. Процесс гидродециклизации протекает через изомеризацию одного из колец, после чего происходит раскрытие кольца. Введение иридия в состав катализатора способствует получению разветвленных углеводородов. При исследовании процесса гидродециклизации в диапазоне температур 300–400°C и начальном давлении водорода 50 атм, установлено, что наибольшей активностью обладает катализатор состава Ir/BEA. Для декалина степень дециклизации при 350°C составила более 50%.

Ключевые слова: гидрирование, гидродециклизация, иридий, цеолиты, нафтенy

DOI: 10.31857/S0028242123050088, **EDN:** RZUCWC

Потребление жидких топлив в транспортном секторе продолжает увеличиваться с начала промышленной революции и до наших дней, что обуславливает потребность продукта с постоянно улучшающимися качествами как топлива, так и сырья в современных нефтеперерабатывающих производствах [1]. Общемировое потребление сырой нефти в период с 2015 по 2019 гг. выросло с 95 до более 100 млн баррелей в день (Мб/день). Из них до 60% приходится на транспортный сектор экономики [2]. По прогнозам, использование сырой нефти достигнет своего пика к 2025 г. из-за интенсивного развития технологий возобновляемых источников энергии (таких как биомасса, солнечная, ветровая и водородная энергии).

Гидрирование нефтяных фракций – один из самых крупнотоннажных процессов в нефтепереработке [3–9]. Данный процесс включает в себя очистку углеводородов (УВ) от сернистых и азотистых соединений, а также удаление смолистых компонентов [10–13]. Увеличение цетанового чис-

ла (ЦЧ) дизельных топлив вследствие получения парафинов с сохранением числа атомов углерода в результате селективного раскрытия циклов нафтенy является альтернативным способом снижения уровня нафтенy в гидрированных фракциях и маслах. Данный способ представлен на схеме из работы [14]. Кроме того, раскрытие циклов нафтенy увеличивает объем продукта за счет постепенного снижения его плотности во время гидрирования сложных полиароматических соединений. Для продуктов гидрирования ароматических соединений в составе дизельных фракций в сочетании с раскрытием кольца может значительно улучшить качество топлив [14–24]. Изучение же раскрытия циклов нафтенy УВ затруднено вследствие конкурирующих реакций, таких как изомеризация и крекинг.

Количественный анализ промежуточных продуктов необходим для более глубокого понимания механизма раскрытия циклов нафтенy и разработки улучшенных катализаторов [15]. Хотя мо-

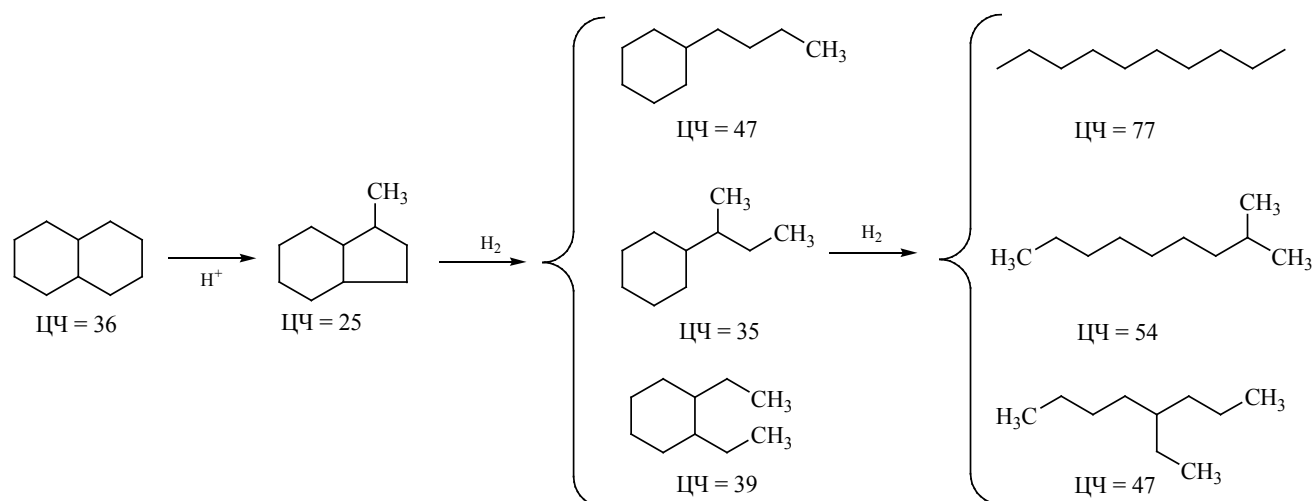


Схема. Зависимость значения цетанового числа (ЦЧ) от строения углеводородов C10 [14].

ноциклические нафтенy, такие как метилциклопентан и метилциклогексан, не являются компонентами реальных дизельных смесей, исследования раскрытия их циклических структур могут дать ценную информацию. Например, изомеризация циклогексанового кольца полициклической молекулы приводит к получению компонентов, содержащих пятичленный цикл, например, метилциклопентан, тогда как гидрирование нафталина приводит к образованию тетралина [25]. Изучение механизмов раскрытия кольца таких молекул необходимо для понимания поведения более сложных молекул, таких как нафталин, тетралин, декалин и индан [21].

В настоящей работе был исследован процесс гидродециклизации декалина и тетралина как модельных соединений среднестиллятных нефтяных фракций на иридийсодержащих катализаторах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве компонентов катализаторов были использованы коммерческие цеолиты NH₄BEA (CP814E, Zeolyst, США), ZSM-5 (CBV3024E, Zeolyst, США), Y (CBV 400, Zeolyst, США), морденит (CBV 21A, Zeolyst, США), MCM-22 (ZR Catalyst CO, KHP), которые переводили в H-форму прокаливанием в течение 6 ч при 550°C. Введение иридия в пористый носитель осуществляли пропиткой по влагоемкости раствором H₂IrCl₆ (ч., ОАО «Аурат», Россия) в расчете на конечное со-

держание иридия в образцах 1.0 мас. %. После пропитки образцы были высушены и прокалены в муфельной печи при 400°C в течение 5 ч. После этого катализаторы были восстановлены в кварцевом реакторе при нагревании до 400°C в токе водорода.

Текстурные характеристики образцов определяли методом низкотемпературной адсорбции азота (77 K) с использованием прибора ASAP 2020 («Micromeritics», США). Перед анализом образцы вакуумировали 6 ч при 350°C. Удельная поверхность катализатора рассчитана по методу БЭТ при относительном парциальном давлении $P/P_0 = 0.2$; общий объем пор определен по методу ВЖН при относительном парциальном давлении $P/P_0 = 0.95$. Общий объем и диаметр пор определены по ветви адсорбции. Состав образцов анализировали методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе PerkinElmer AAnalyst (CA).

Просвечивающие электронные микрофотографии (ПЭМ) образцов выполнены на приборе JEOL JEM-2100 (Япония) с ускоряющим напряжением 200 кВ.

Растровую электронную микроскопию (СЭМ) полученных образцов проводили на микроскопе Carl Zeiss NVision 40 (Германия), оснащенном анализатором X-Max Oxford Instruments (80 мм²).

Импульсную хемосорбцию СО проводили в кварцевом реакторе с использованием AutoChem 2950HP (Micromeritics Instrument Corp.; Норкросс,

Джорджия, США). Образцы восстанавливали H_2 при $350^\circ C$ в течение 30 мин, продували He в течение 30 мин и охлаждали до комнатной температуры. Газовая смесь: 3% CO + He.

Исследование катализаторов методом РФЭС проводили на спектрометре «PREVAC EA15» (Польша), оснащенном полусферическим анализатором высокого разрешения. Для возбуждения спектров использовали характеристическое немонохроматизированное рентгеновское излучение AlK_α ($h\nu = 1486.6$ эВ, 150 Вт). Давление остаточных газов в ходе измерения не превышало 5×10^{-9} мбар. Шкала энергий связи ($E_{св}$) была предварительно откалибрована по положению фотоэлектронных линий остовных уровней золота (Au 4f7/2 – 84.0 эВ), серебра (Ag 3d5/2 – 368.3 эВ). Эффект зарядки, возникающий в процессе фотоэмиссии электронов, учитывали, используя в качестве внутреннего стандарта положение линии C1s ($E_{св} = 284.8$ эВ) атомов углерода, входящих в состав поверхностных примесей. Деконволюцию спектров проводили с использованием программного обеспечения CasaXPS с учетом параметров фона, рассчитанных по алгоритму Ширли.

Гидродециклизацию смесей ароматических УВ проводили в стальном автоклаве (внутренний объем 10 см³), снабженном магнитной мешалкой и манометром. В автоклав загружали 50 мг мелко-растертого катализатора и 2 г субстрата. Автоклав заполняли водородом до давления 50 атм. Реакцию проводили при $300\text{--}350^\circ C$. После окончания реакции автоклав быстро охлаждали до комнатной температуры, давление стравливали до атмосферного. Анализ продуктов проводили методами ГЖХ на хроматографе Кристалл-Люкс с пламенно-ионизационным детектором, капиллярной колонкой PetrocolTM (Supelco), 0.25 мм $\times$ 50 м, газ-носитель – гелий и методом хромато-масс-спектрометрии на приборе Finnigan MAT 95 XL (США), оборудованном хроматографом с капиллярной колонкой Varian VF-5MS (30 м $\times$ 0.25 мм $\times$ 0.25 мкм), газ-носитель – гелий.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ:

Известно [27], что превращение декалина в разветвленные УВ в процессе гидродециклизации (ГДЦ) протекает через промежуточную стадию

изомеризации в другие бициклические углеводороды (см. схему). В литературе ГДЦ нафтяных УВ с использованием твердокислотных катализаторов изучалось гл. обр. на цеолитах, обладающих высокой концентрацией бренстедовских кислотных центров, которые протонируют циклический УВ, что приводит к изомеризации и последующему разрыву связи C–C. Такими наиболее известными твердокислотными катализаторами являются цеолиты: H-Beta, HY, морденит и H-ZSM-5, которые были исследованы разными авторами в раскрытии циклогексановых и циклопентановых УВ [21, 26].

В настоящей работе была исследована каталитическая активность цеолитов H-Beta, HY, морденит, MCM-22 и H-ZSM-5 в гидродециклизации декалина, для выбора их в качестве носителей для создания иридийсодержащих катализаторов гидродециклизации.

Результаты каталитических экспериментов, приведенные на рис. 1, показывают, что тип цеолита существенно влияет на активность в изомеризации декалина. Стоит отметить, что между кислотностью материала и выходом продуктов с раскрытием цикла нет явной зависимости (табл. 1). Поскольку ZSM-5 и морденит проявили самую низкую активность в реакции изомеризации декалина, то для синтеза иридиевых катализаторов были выбраны три типа носителей – BEA, MCM-22 и HY. Можно предположить, что вследствие большего размера пор цеолиты BEA, MCM-22 и HY обладают большей каталитической активностью, в то время как молекула декалина, имеющая линейный размер > 7 Å, не сможет проникнуть в поры такого цеолита как ZSM-5, имеющего каналы диаметром ~ 5.5 Å вследствие диффузионных ограничений.

Введение иридия в пористый носитель осуществляли методом пропитки по влагоемкости в водном растворе H_2IrCl_6 в расчете на итоговое содержание Ir в образцах 1 мас. %. Согласно данным низкотемпературной адсорбции–десорбции азота (табл. 1), полученные катализаторы имеют удельную поверхность от 394 до 706 м²/г. Наибольшей удельной поверхностью – 706 м²/г обладал образец Ir/Y. Стоит отметить, что нанесение иридия на выбранные носители не привело к хоть сколько-нибудь значимым изменениям удельной площади поверхности.

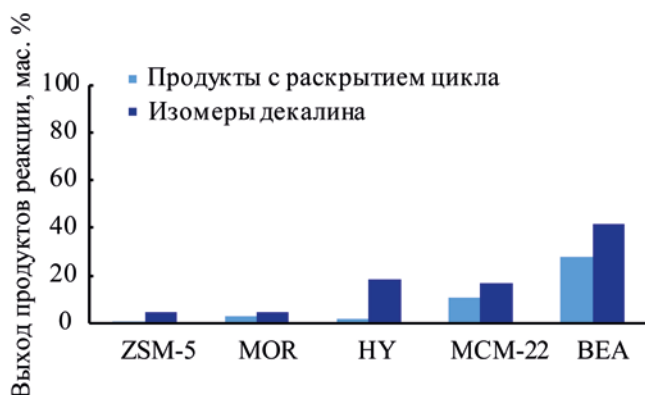


Рис. 1. Каталитическая активность в изомеризации декалина на различных цеолитах (условия экспериментов: 350°C, 50 атм H_2 , 3 ч, масса субстрата – 2 г, масса катализатора – 50 мг).

Изотермы низкотемпературной адсорбции–десорбции азота катализаторов несколько отличаются друг от друга. В области низких давлений изотермы трех образцов представляют собой I тип изотерм, характерный для микропористых материалов. В области высоких давлений образцы Ir/Y и Ir/BEA занимают промежуточное положение между IV типом с характерной петлей гистерезиса для мезопористых материалов и I типом, характерным для микропористых материалов (рис. 2). Наличие микропористой структуры в синтезированных катализаторах подтверждено методами ПЭМ и РЭМ (рис. 3). На микрофотографиях РЭМ представлены частицы, характерные для соответствующих цео-

литов. Также на микрофотографиях можно обнаружить наночастицы Ir размерами до 10 нм.

Состояние активной фазы в катализаторах изучали методом РФЭС. Спектр Ir 4f образцов катализаторов (рис. 4) содержит два пика с центрами при 61.0 и 64.0 эВ, относящиеся к Ir(0) 4f7/2 и Ir(0) 4f5/2 соответственно. Таким образом, восстановление иридия в данных условиях проходит количественно.

Катализаторы на основе цеолитов проявили высокую активность в гидродециклизации модельных соединений (декалин, тетралин).

При гидродециклизации чистого декалина наибольшую активность проявили катализаторы Ir/Y и Ir/BEA (табл. 2), для которых конверсия превысила 50% при 350°C, а селективность по продуктам с раскрытием колец составила до 70%. Для этих же образцов, как и для Ir/MCM-22, наблюдалась максимальная конверсия тетралина до 100%.

Наибольшую активность в побочных реакциях крекинга проявил катализатор на основе цеолита MCM-22. В ряде экспериментов выход продуктов крекинга составил более 50%. По всей видимости, данный факт можно объяснить микропористой структурой катализатора с соответствующими диффузионными ограничениями. Образцы на основе цеолитов типа Y и BEA обладают более широким распределением пор по размерам, что в конечном итоге сказывается на активности в гидродециклизации. Катализатор на основе MCM-22 проявил меньшую активность во всех эксперимен-

Таблица 1. Характеристики микропористых катализаторов

Катализатор	$S_{\text{ВЕТ}}$, м ² /г	Si/Al (ат.)*	$V_{\text{пор}}$, см ³ /г	Общая кислотность, мкмоль/г**	Средний размер частиц Ir, нм***
ZSM-5 (CBV 3024E)	380	15	0.23	1180	–
MOR (CBV 21A)	530	11	0.25	1310	–
HY (CBV 400)	706	2.6	0.70	1400	–
MCM-22	401	16	0.25	1050	–
BEA (CP814E)	650	13	0.98	1100	–
Ir/MCM-22	394	16	0.25	–	3.4
Ir/BEA	665	13	0.86	–	2.1
Ir/Y	706	2.6	0.70	–	2.4

* Определено с помощью ААС.

** Определено с помощью NH_3 -ТПД.

***Определено с помощью хемосорбции CO.

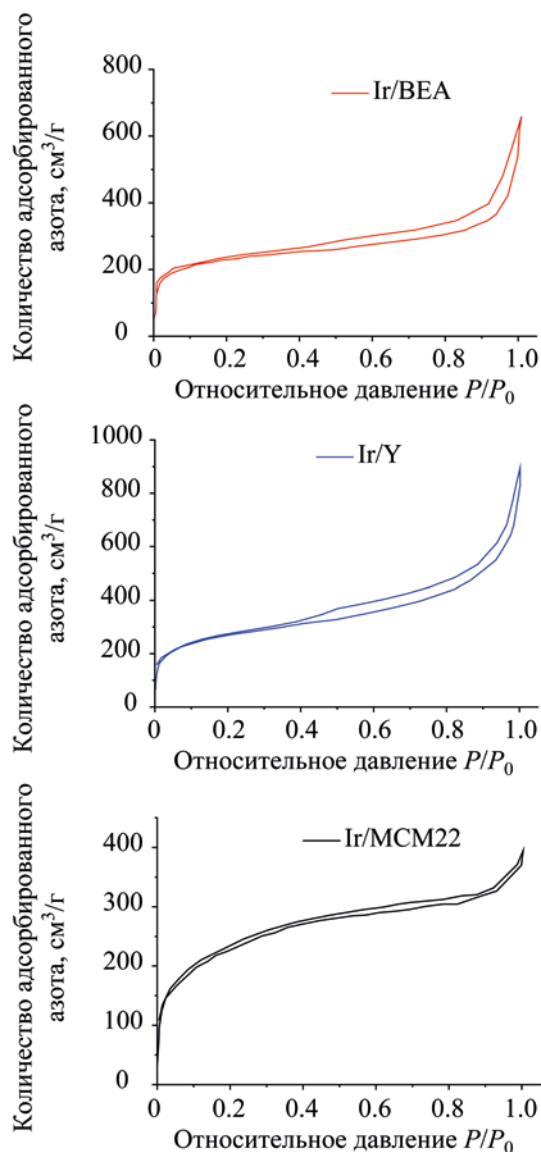


Рис. 2. Изотермы низкотемпературной адсорбции–десорбции азота.

тах при 300°C, несмотря на достаточно высокую кислотность. В более ранней работе было показано, что при гидрировании средних дистиллятов кислотность материалов существенно влияет на активность катализатора [17].

Присутствие сильных кислотных центров в материале BEA не приводит к получению дополнительных газообразных продуктов. Так, в экспериментах по гидродециклизации модельных соединений в случае катализатора Ir/BEA образование

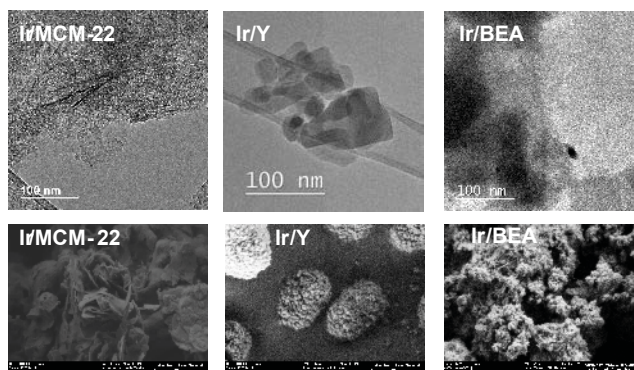


Рис. 3. Микрофотографии ПЭМ (вверху) и РЭМ (внизу): образцов Ir/MCM-22, Ir/Y и Ir/BEA.

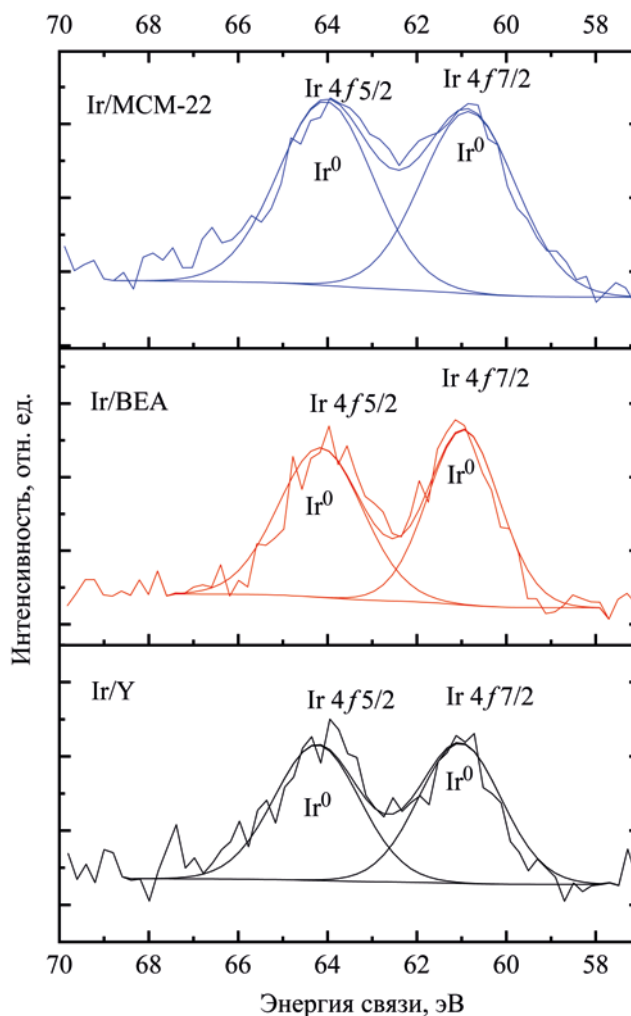


Рис. 4. Спектры РФЭС Ir 4f5/2 и 4f7/2 синтезированных катализаторов.

Таблица 2. Гидрирование модельных смесей на Ir-катализаторах, 50 атм H₂, $\tau = 3$ ч

300°C			
Показатель	Ir/MCM-22	Ir/Y	Ir/BEA
Декалин			
Конверсия декалина, мас. %	4	8	7
Селективность по ПРК*	0	0	50
Селективность по ПИ**	0	100	50
Тетралин			
Конверсия тетралина	44	59	66
325°C			
Декалин			
Конверсия декалина, мас. %	17	17	17
Селективность по ПРК*	17	17	17
Селективность по ПИ**	83	83	83
Тетралин			
Конверсия тетралина	100	100	100
350°C			
Декалин			
Конверсия декалина, мас. %	42	42	42
Селективность по ПРК*	33	33	33
Селективность по ПИ**	67	67	67
Тетралин			
Конверсия тетралина	100	100	100

* Продукты с раскрытием цикла.

** Продукты изомеризации.

продуктов крекинга не наблюдалось даже при высоких температурах.

При использовании тетралина в качестве модельного соединения селективность по продуктам крекинга была существенно ниже, чем в случае декалина. Однако, основным продуктом процесса в данном случае являлся декалин (преимущественно в *транс*-форме).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей работе была показана принципиальная возможность получения продуктов с раскрытием цикла с использованием катализаторов на основе различных цеолитов. Введение иридия в состав катализатора позволяет увеличить выход продуктов гидродецклизации за счет активности Ir в разрыве C–C-связей. Наибольшую активность проявил катализатор Ir/BEA, при 350°C, 50 атм H₂ конверсия составила 70%, селективность по продуктам с раскрытием цикла – 40%.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования проводились в рамках проекта РНФ №22-79-10294.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Аналитический центр проблем глубокой переработки нефти и нефтехимии» ИНХС РАН. Авторы выражают благодарность ЦКП ФМИ ИОНХ РАН за содействие в проведении исследований свойств катализаторов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

А.Л. Максимов является главным редактором журнала «Нефтехимия». Остальные соавторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мамян Лилит Гагиковна, м.н.с. ИНХС РАН, <https://orcid.org/0000-0003-0307-8017>

Садовников Алексей Александрович, н.с. ИНХС РАН, <https://orcid.org/0000-0002-3574-0039>

Арапова Ольга Владимировна, к.х.н., н.с. ИНХС РАН, <https://orcid.org/0000-0001-9963-6305>

Максимов Антон Львович, д.х.н., проф., чл.-корр. РАН, <http://orcid.org/0000-0001-9297-4950>

Наранов Евгений Русланович, к.х.н., с.н.с. ИНХС РАН, <http://orcid.org/0000-0002-3815-9565>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yadav V.G., Yadav G.D., Patankar S.C. The production of fuels and chemicals in the new world: critical analysis of the choice between crude oil and biomass vis-à-vis sustainability and the environment // *Clean Technol. Environ. Policy*. 2020. V. 22. P. 1757–1774. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01945-5>
2. Jampaiah D., Murzin D.Y., Lee A.F., Schaller D., Bhargava S.K., Tabulo B., Wilson K. Catalytic selective ring opening of polyaromatics for cleaner transportation fuels // *Energy Environ. Sci*. 2022. V. 15. № 5. P. 1760–1804. <https://doi.org/10.1039/D1EE02363B>
3. Naranov E.R., Sadovnikov A.A., Arapova O.V., Bugaev A.L., Usoltsev O.A., Gorbunov D.N., Russo V., Murzin D.U., Maximov A.L. Mechanistic insights on Ru nanoparticle *in situ* formation during hydrodeoxygenation of lignin-derived substances to hydrocarbons // *Catal. Sci. Technol*. 2023. V. 13. № 5. P. 1571–1583. <https://doi.org/10.1039/D2CY01127A>
4. Широкопояс С.И., Баранова С.В., Максимов А.Л., Кардашев С.В., Куликов А.Б., Наранов Е.Р., Винокуров В.А., Лысенко С.В., Караханов Э.А. Гидрирование ароматических углеводородов в присутствии дибензотиофена на платино-палладиевых катализаторах на основе алюмосиликатов // *Нефтехимия*. 2014. Т. 54. № 2. С. 95–100. <https://doi.org/10.7868/S0028242114020105> [Shirokopoyas S.I., Baranova S.V., Maksimov A.L., Kardashev S.V., Kulikov A.B., Naranov E.R., Vinokurov V.A., Lysenko S.V., Karakhanov E.A. Hydrogenation of aromatic hydrocarbons in the presence of dibenzothiophene over platinum-palladium catalysts based on Al-SBA-15 aluminosilicates // *Petrol. Chemistry*. 2014. V. 54. P. 94–99. <https://doi.org/10.1134/S0965544114020108>]
5. Naranov E., Sadovnikov A., Arapova O., Kuchinskaya T., Usoltsev O., Bugaev A., Janssens K., De Vos D., Maximov A. The *in-situ* formation of supported hydrous ruthenium oxide in aqueous phase during HDO of lignin-derived fractions // *Appl. Catal. B*. 2023. V. 334. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.122861>
6. Naranov E.R., Sadovnikov A.A., Bugaev A.L., Shavaleev D.A., Maximov A.L. A stepwise fabrication of MFI nanosheets in accelerated mode // *Catal. Today*. 2021. V. 378. P. 149–157. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.06.011>
7. Наранов Е.Р., Дементьев К.И., Герзелиев И.М., Колесниченко Н.В., Ролдугина Е.А., Максимов А.Л. Роль цеолитного катализа в современной нефтепереработке: вклад отечественных разработок // *Современные молекулярные сита*. 2019. Т. 1. № 1. [Naranov E.R., Dement'ev K.I., Gerzeliev I.M., Kolesnichenko N.V., Roldugina E.A., Maksimov A.L. The role of zeolite catalysis in modern petroleum refining: contribution from domestic technologies // *Petrol. Chemistry*. 2019. V. 59. P. 247–261. <https://doi.org/10.1134/S0965544119030101>]
8. Naranov E.R., Maximov A.L. Selective conversion of aromatics into *cis*-isomers of naphthenes using Ru catalysts based on the supports of different nature // *Catal. Today*. 2019. V. 329. P. 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.10.068>
9. Голубев О.В., Егазарьянц С.В., Матевосян Д.В., Наранов Е.Р., Максимов А.Л., Караханов Э.А. Разработка состава катализаторов защитного слоя для удаления соединений хлора из дизельных фракций // *Журн. прикл. химии*. 2018. Т. 91. № 12. С. 1778–1783. <https://doi.org/10.1134/S0044461818120125> [Golubev O.V., Egazar'yants S.V., Matevosyan D.V., Naranov E.R., Maksimov A.L., Karakhanov E.A. Development of protective-layer catalysts for removal of chlorine compounds from diesel fractions // *Russ. J. Appl. Chem*. 2018. V. 91 P. 2040–2045. <https://doi.org/10.1134/S1070427218120169>]
10. Pérot G. Hydrotreating catalysts containing zeolites and related materials—mechanistic aspects related to deep desulfurization // *Catal. Today*. 2003. V. 86. № 1–4. P. 111–128. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(03\)00407-3](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(03)00407-3)
11. Shimada H., Yoshitomi S., Sato T., Matsubayashi N., Imamura M., Yoshimura Y., Nishijima A. Dual-functional Ni-Mo sulfide catalysts on zeolite-alumina supports for hydrotreating and hydrocracking of heavy oils // *Stud. Surf. Sci. Catal*. 1997. V. 106. P. 115–128. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(97\)80010-9](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(97)80010-9)
12. Sundaramurthy V., Eswaramoorthi I., Dalai A.K., Adjaye J. Hydrotreating of gas oil on SBA-15 supported NiMo catalysts // *Microporous Mesoporous Mater*. 2008. V. 111. № 1–3. P. 560–568. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.08.037>
13. Dufresne P. Hydroprocessing catalysts regeneration and recycling // *Appl. Catal. A: Gen*. 2007. V. 322. P. 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2007.01.013>

14. Aho A., Roggan S., Simakova O.A., Salmi T., Murzin D.Y. Structure sensitivity in catalytic hydrogenation of glucose over ruthenium // *Catal. Today*. 2015. V. 241. P. 195–199. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2013.12.031>
15. Calemma V., Giardino R., Ferrari M. Upgrading of LCO by partial hydrogenation of aromatics and ring opening of naphthenes over bi-functional catalysts // *Fuel Process. Technol.* 2010. V. 91. № 7. P. 770–776. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.02.012>
16. Bjelić A., Grilc M., Huš M., Likozar B. Hydrogenation and hydrodeoxygenation of aromatic lignin monomers over Cu/C, Ni/C, Pd/C, Pt/C, Rh/C and Ru/C catalysts: mechanisms, reaction micro-kinetic modelling and quantitative structure-activity relationships // *Chem. Eng. J.* 2019. V. 359. P. 305–320. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.107>
17. He T., Wang Y., Miao P., Li J., Wu J., Fang Y. Hydrogenation of naphthalene over noble metal supported on mesoporous zeolite in the absence and presence of sulfur // *Fuel*. 2013. V. 106. P. 365–371. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.12.025>
18. Weitkamp J. Catalytic hydrocracking—mechanisms and versatility of the process // *ChemCatChem*. 2012. V. 4. № 3. P. 292–306. <https://doi.org/10.1002/cctc.201100315>
19. Song C. An overview of new approaches to deep desulfurization for ultra-clean gasoline, diesel fuel and jet fuel // *Catal. Today*. 2003. V. 86. P. 211–263. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(03\)00412-7](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(03)00412-7)
20. Topsøe H., Clausen B.S., Massoth F.E. Catalysis: Science and Technology. Springer Berlin, Heidelberg, 1996. P. 1–269. https://doi.org/10.1007/978-3-642-61040-0_1
21. Du H., Fairbridge C., Yang H., Ring Z. The chemistry of selective ring-opening catalysts // *Appl. Catal. A* Gen. 2005. V. 294. P. 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2005.06.033>
22. Zhang H., Meng X., Li Y., Lin Y.S. MCM-41 Overgrown on Y composite zeolite as support of Pd–Pt catalyst for hydrogenation of polyaromatic compounds // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2007. V. 46. P. 4186–4192. <https://doi.org/10.1021/ie061138e>
23. Fu D., van der Heijden O., Stanciakova K., Schmidt J.E., Weckhuysen B.M. Disentangling reaction processes of zeolites within single-oriented channels // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2020. V. 59. № 36. P. 15502–15506. <https://doi.org/10.1002/anie.201916596>
24. Song C., Ma X. New design approaches to ultra-clean diesel fuels by deep desulfurization and deep dearomatization // *Appl. Catal. B*. 2003. V. 41. № 1–2. P. 207–238. [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(02\)00212-6](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(02)00212-6)
25. Escalona G., Rai A., Betancourt P., Sinha A.K. Selective poly-aromatics saturation and ring opening during hydroprocessing of light cycle oil over sulfided Ni–Mo/SiO₂–Al₂O₃ catalyst // *Fuel*. 2018. V. 219. P. 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.134>
26. Santana R., Do P., Santikunaporn M., Alvarez W., Taylor J., Sughrue E., Resasco D. Evaluation of different reaction strategies for the improvement of cetane number in diesel fuels // *Fuel*. 2006. V. 85. № 5–6. P. 643–656. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.08.028>
27. Jacquín M., Jones D.J., Rozière J., López A.J., Rodríguez-Castellón E., J. Trejo Menayo J.M., Lenarda M., Storaro L., Vaccari A., Albertazzi S.J. Cetane improvement of diesel with a novel bimetallic catalyst // *J. Catal.* 2004. V. 228. № 2. P. 447–459. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2004.09.017>