

УДК 542.943+662.753

ПОЛУЧЕНИЕ НЕФТЯНЫХ КИСЛОТ ОКИСЛЕНИЕМ ДЕАРОМАТИЗИРОВАННОГО МАСЛЯНОГО ДИСТИЛЛЯТА

© 2024 г. В. М. Аббасов¹, Л. М. Эфендиева¹, Г. Г. Насибова^{1,*}, Н. М. Алиева¹,
С. Ф. Ахмедбекова¹, Ю. П. Черепнова¹, Ш. Р. Мамедова¹, А. С. Лядов^{2,**}

¹Институт нефтехимических процессов им. Ю. Г. Мамедалиева,
Министерство науки и образования Азербайджанской Республики,
пр. Ходжалы 30, Баку, AZ 1025 Азербайджан

²Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Москва, 119991 Россия
E-mail: *nasibovag@inbox.ru, **lyadov@ips.ac.ru

Поступила в редакцию 1.03.2024

После доработки 28.11.2024

Принята к публикации 4.12.2024

В работе представлены результаты исследования жидкофазного окисления деароматизированного масляного дистилята, выделенного из смеси азербайджанских нефтей в присутствии гомогенных катализаторов на основе бромбензоатов Mn(II), Cr(III) и Co(II). Показано, что данные катализаторы позволяют с высоким выходом (более 40 мас.%) получать синтетические нефтяные кислоты и гидроксикислоты. Установлено влияние природы катализаторов на состав образующихся продуктов окисления. Наибольшую каталитическую активность проявил бромбензоат Mn(II), для которого были определены оптимальные условия проведения процесса: длительность окисления при скорости подачи сырья 300 л/кг·ч и атмосферном давлении составляет 5 ч, концентрация катализатора 1 мас.%, температура 140°C. При таких условиях суммарный выход нефтяных кислот составил 46%.

Ключевые слова: нефтяные кислоты и гидроксикислоты; аэробное окисление; катализаторы окисления

DOI: 10.56304/S2414215824020035; EDN: NOXIBF

Окисление углеводородов (УВ) — сложный процесс получения ценных кислородсодержащих продуктов: гидропероксидов, спиртов, кетонов, альдегидов, эфиров, карбоновых кислот. Данные вещества широко применяются как в виде самостоятельных товарных продуктов, так, в качестве сырья для процессов нефтехимического синтеза [1–4]. Жидкофазное окисление УВ обладает целым рядом преимуществ по сравнению с газофазными процессами — высокая селективность в отношении целевых продуктов, безопасность эксплуатации, более низкие капитальные и операционные затраты и др. [5, 6].

Нефтяные кислоты, представляющие собой смесь алифатических и нафтеновых кислот, и их производные, используют в различных отраслях промышленности в качестве ингибиторов коррозии, пластификаторов, сиккативов, эмульгаторов, бактерицидов и т. д. [7, 8]. Добываемые нефти обычно содержат небольшое количество нефтяных кислот (не более 3%), а наличие в выделяемых кислотах алкилфенолов затрудняет их дальнейшее использование.

По этой причине получение аналогов природных нефтяных кислот синтетическим путем привлекает внимание исследователей.

Окисление определенных фракций нефти в присутствии подходящих каталитических систем позволяет получать синтетические нефтяные кислоты и гидроксикислоты. Такой подход для их получения является экологически и экономически выгодным, что подтверждается большим количеством работ в этой области [9–13].

В качестве гомогенных катализаторов окисления применение находят различные соединения *d*-металлов [14–16]. Жидкофазное окисление УВ воздухом, в частности, *n*-ксилола, кумола, этилбензола/изобутана, циклогексана и *n*-бутана, имеет промышленное значение. Для этих процессов используют в качестве катализаторов растворимые в сырье соли металлов (Co, Mn и др.). С целью увеличения активности катализатора в реакционную систему добавляют компоненты, содержащие бром (бромид-ионы) [17]. В качестве примера можно привести промышленный процесс получения фталевого

ангидрида жидкофазным окислением *o*-ксилола воздухом в присутствии ацетатов или нафтенатов Co, Mn или Mo, дополнительно содержащих органические соединения брома. Окисление ведут при температуре 150°C; селективность в отношении фталевой кислоты достигает 90%, что значительно превышает селективность, которая достигается при газофазном окислении *o*-ксилола в присутствии гетерогенных катализаторов на основе V₂O₅ [18].

Поиск каталитически активных соединений в процессах жидкофазного окисления УВ, содержащих одновременно ионы металлов и бром, привлекает внимание исследователей, так как позволяет избежать применения бромсодержащих сокатализаторов.

Таким образом, цель настоящего исследования заключается в изучении особенностей окисления деароматизированного масляного дистиллята, выделенного из смеси азербайджанских нефтей, в присутствии бромбензоатов металлов (Mn, Co и Cr) и определение оптимальных условий получения синтетических нефтяных кислот.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве субстрата для исследования процесса окисления был выбран дистиллят, выделенный из смеси азербайджанских нефтей на нефтеперерабатывающем заводе имени Г. Алиева, который приме-

няется для получения товарного трансформаторного масла Т-1500. Перед окислением дистиллят подвергали деароматизации четырехкратной обработкой концентрированной серной кислотой. Удаление ароматических компонентов из дистиллята косвенно подтверждается увеличением содержания водорода в деароматизированном дистилляте (табл. 1). Содержание ароматических компонентов также контролировали методом ¹H ЯМР. Установлено, что после обработки серной кислотой дистиллят содержал следы ароматических соединений. В табл. 1 приведены физико-химические характеристики исходного дистиллята и дистиллята после сернокислотной обработки.

В качестве катализаторов для процесса жидкофазного окисления, были использованы бромбензоаты Mn(II), Co(II) и Cr(III), которые синтезировали следующим образом. В колбу помещали рассчитанные количества бромбензойной кислоты (97%, Sigma Aldrich), добавляли 20%-ный водный раствор гидроксида калия (90%, Sigma Aldrich) и перемешивали полученную смесь в течение 10–15 мин. Затем готовили 10%-ные водные растворы солей металлов: MnSO₄·5H₂O (99%, Sigma Aldrich), Cr(NO₃)₃·9H₂O (99%, Sigma Aldrich), Co(NO₃)₂·6H₂O (98%, Sigma Aldrich). Полученные растворы в стехиометрических количествах добавляли к раствору бромбензоата калия при температуре 60–80°C и перемешивали в течение 40 мин. Полученные бромбензоаты Mn,

Таблица 1. Физико-химические характеристики используемого сырья

Показатель	Исходный дистиллят	Дистиллят после деароматизации
Описание	Очищенная фракция нефти, кипящая в температурном интервале 300–400°C	Деароматизированный исходный дистиллят
Кинематическая вязкость при 20°C, мм ² /с	22.66	22.25
Плотность при 20°C, г/см ³	0.884	0.869
Температура застывания, °C	–58	–55
Коэффициент преломления при 20°C	1.4881	1.4772
Температура вспышки, °C	130	141
Спектр ¹ H ЯМР, м.д.	0.73–0.95 (CH ₃); 1.16 (CH ₂), 1.53–2.00 (CH, CH ₂ — нафтенy), 2.1–2.65 (по отношению к ароматике α-CH ₂), 6.50–7.80 (ароматика)	0.72–0.96 (CH ₃), 1.16 (CH ₂), 1.50–2.00 (CH, CH ₂ — нафтенy), 2.1–2.60 (по отношению к ароматике α-CH ₂ , следы), 6.50–7.00 (ароматика, следы)
ИК-спектр, см ^{–1}	1457, 1376 ср (CH), 1032, 963 о сл (CH), 812, 744 сл (CH)	2951, 2920, 2853 с (CH); δ, см ^{–1} : 1458, 1376, 722 ср (CH), 963 о сл (CH)
Содержание, мас. %		
С	89.8	85.2
Н	10.09	14.77
С	0.11	0.03

Со и Сг высушивали на воздухе при 100°C в течение нескольких часов.

Жидкофазное окисление в присутствии синтезированных катализаторов изучали на установке барботажного типа при скорости подачи окислителя (воздуха) 300 л/кг·ч. Каталитические эксперименты проводили при температуре 130–140°C, концентрацию катализатора варьировали в диапазоне 0.3–1.5 мас.%, длительность окисления составляла от 1 до 7 ч.

Так как в процессе окисления образуются не только синтетические нефтяные кислоты (СНК), но и ряд других продуктов: альдегиды, кетоны, спирты, синтетические нефтяные оксикислоты (СНОК) и др., то для выделения кислот и гидроксикислот из получаемых оксидатов была использована следующая методика. Полученный оксидат помещали в емкость (снабженную механической мешалкой), добавляли растворитель (изооктан) в соотношении 1 : 3 и перемешивали в течение 30 мин. После отстаивания данной смеси образовывалось два слоя: верхний, содержащий нефтяные кислоты и непрореагировавший субстрат, и нижний, содержащий оксикислоты. Нижний слой отделяли, высушивали и взвешивали. Верхний слой помещали в колбу и дополнительно добавляли 20%-ный водный раствор щелочи и 30 мин перемешивали при температуре 80–90°C. Полученная смесь состояла из двух слоев: углеводородного и водного, содержащего соли нефтяных кислот. К водному слою добавляли 40%-ный раствор серной кислоты для выделения нефтяных кислот, которые отделяли, высушивали и взвешивали. Таким образом, для всех каталитических экспериментов определяли выход синтетических нефтяных кислот и гидроксикислот, а также их сумму.

Спектры ^1H -ЯМР регистрировали на спектрометре MAGRITEK при частоте 61.74 МГц. В качестве растворителя использовали дейтерированный ацетон. ИК-спектры на спектрометре Фурье модели «ALPHA» (Bruker, Германия) в комплекте с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения с призмой алмаз, предназначенной для анализа твердых, жидких, порошкообразных и вязких образцов в диапазоне сканирования 4000–400 см^{-1} . Элементный анализ выполнен на анализаторе TrusPec Micro, LECO (США). Кинематическая вязкость определена на приборе Stabinger SVM, плотность — на приборе DMA 4500M, коэффициенты преломления — на приборе Abbemat 500. Температуры замерзания и вспышки определены по ГОСТ 20287-91 и ГОСТ 4333-87 соответственно. Кислотное число продуктов окисления определяли в соответствии с ГОСТ 5985-79. Термические исследования проводили на синхронном термоанализаторе STA-449

(«JupiterF3» фирмы NETZSCH, Германия) в интервале 23–850°C при скорости повышения температуры 10°C/мин в потоке азота.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Все три исследованных катализатора проявили активность в процессе окисления деароматизированного дистиллята, о чем свидетельствовало повышение кислотности оксидата: кислотное число исходного субстрата не превышало 0/05 мг КОН/г, а для окисленного продукта данный показатель составлял 30–40 мгКОН/г.

Бромбензоат Mn(II) позволяет получать нефтяные кислоты с наибольшим выходом, так при концентрации катализатора 1.0 мас.% выход синтетических нефтяных кислот (СНК) равен 30% (рис. 1, а). Данный катализатор проявляет наибольшую активность и в отношении образования гидроксикислот (СНОК), выход которых составлял 17%. В присутствии бромбензоатов Сг и Со достигаются сопоставимые выходы СНК на уровне 26–27%, однако, бромбензоат Со в меньшей степени катализирует образование СНОК, выход которых не превышал 7%.

На рис. 1, б–г показано влияние концентрации катализатора в реакционной системе на выход кислот в присутствии исследуемых каталитических систем. С увеличением концентрации катализатора вплоть до 1 мас.% в присутствии всех катализаторов происходит рост количества нефтяных кислот в оксидате. Дальнейшее увеличение концентрации катализатора негативно влияет на выход продуктов окисления и их выход снижается. Данная закономерность объясняется тем, что при достижении определенной концентрации катализатор начинает проявлять ингибирующее действие, которое тормозит процесс окисления.

С целью определения оптимальных условий получения нефтяных кислот в присутствии наиболее активного катализатора бромбензоата Mn было изучено действие температуры и времени процесса на выход нефтяных кислот и гидроксикислот (табл. 2).

Увеличение продолжительности окисления приводит к росту кислотного числа оксидата, значение которого достигает плато через 5 ч. Максимальное количество нефтяных кислот также образуется через 5 ч; дальнейшее увеличение времени окисления приводит к тому, что часть нефтяных кислот переокисляется с образованием нефтяных гидроксикислот, о чем свидетельствует рост выхода СНОК через 6 и 7 ч. При 140°C достигается максимальный выход СНК; дальнейшее повышение температуры вызывает окислительное расщепление компонентов реакционной среды, в результате чего увеличивается

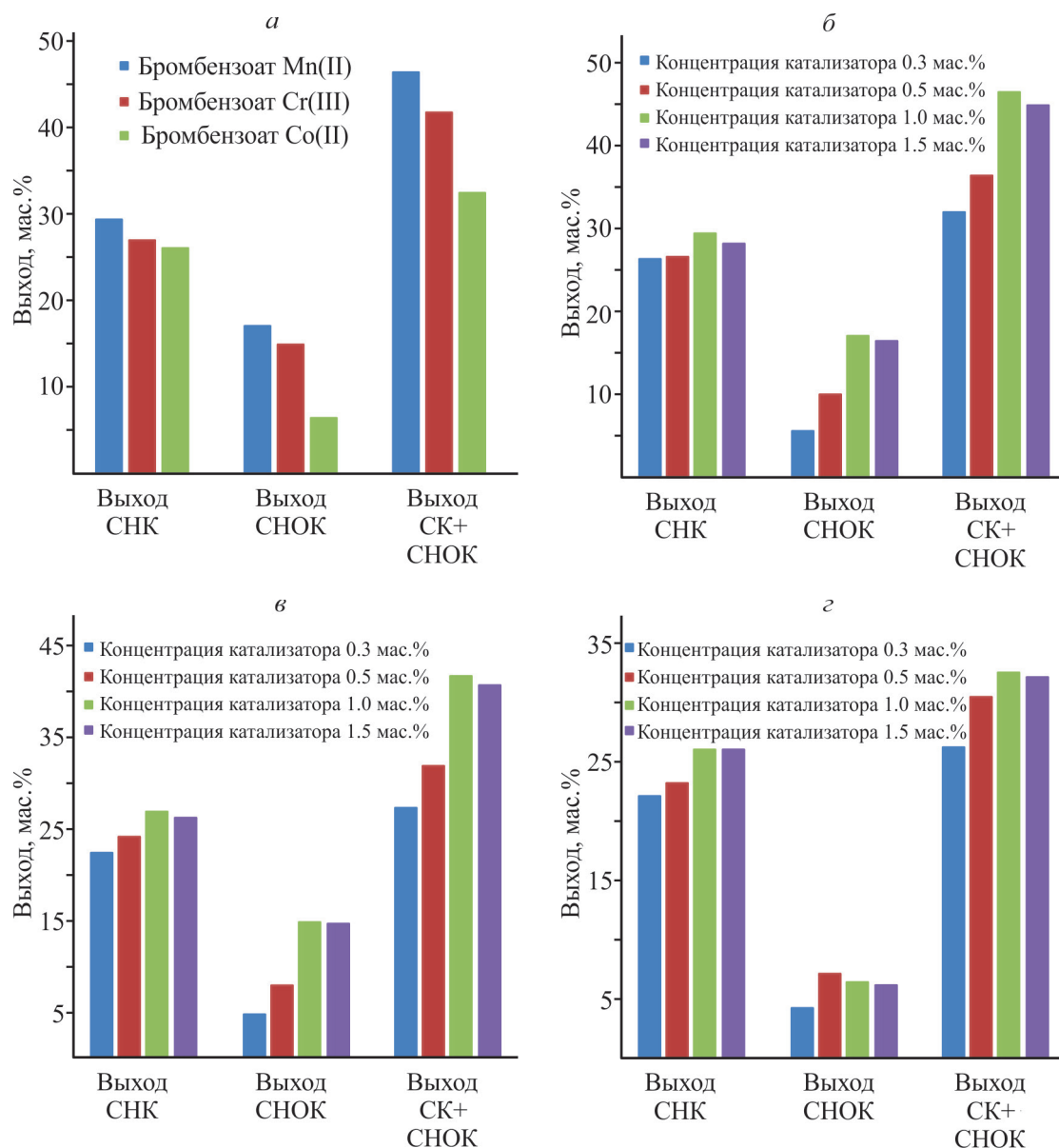


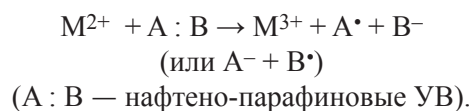
Рис. 1. Зависимость выхода продуктов окисления нефтяной фракции от природы и концентрации катализаторов (условия реакции — 140°C, 5 ч): *а* — влияние природы катализатора (концентрация 1 мас.%); влияние концентрации катализатора: *б* — бромбензоат Mn(II), *в* — бромбензоат Cr(III), *г* — бромбензоат Co(II).

образование нежелательных водорастворимых веществ, что затрудняет процесс выделения нефтяных кислот.

Была изучена термическая устойчивость бромбензоата Mn(II), термограмма его разложения приведена на рис. 2. Показано, что до температуры 360°C образец не подвергается химическим превращениям, что позволяет его использовать в качестве катализатора в процессе окисления при исследуемых температурах.

Действие катализаторов в гомогенном процессе окисления можно объяснить тем, что компоненты каталитической системы претерпевают сложные

физико-химические превращения. Наличие в каталитической системе металлов с переменной валентностью приводит к образованию свободных радикалов или атомов, способствующих ускорению реакции окисления:



При введении бромид-ионов в реакционную систему появляется новый маршрут окисления УВ с участием атомов брома, образующихся в окисли-

Таблица 2. Окисление деароматизированного дистиллята в присутствии бромбензоата Mn(II) в зависимости от температуры процесса и его продолжительности (концентрация катализатора 1 мас.%)

Показатель	Кислотное число оксидата, мгКОН/г	Выход кислот, %		Выход СНК + СНОК, %
		СНК	СНОК	
Продолжительность процесса, 140°С				
1 ч	5	1.5	следы	1.5
2 ч	18.50	3.8	1.2	5.0
3 ч	25.48	12.6	6.4	19.0
4 ч	32.81	18.3	12.2	30.5
5 ч	45.24	29.4	17.0	46.4
6 ч	46.15	27.3	19.4	46.7
7 ч	46.42	25.2	20.6	45.8
Температура процесса, длительность окисления 5 ч				
130°С	—	24.2	6.2	30.4
140°С	—	29.4	17.0	46.4
150°С	—	19.4	22.7	42.1

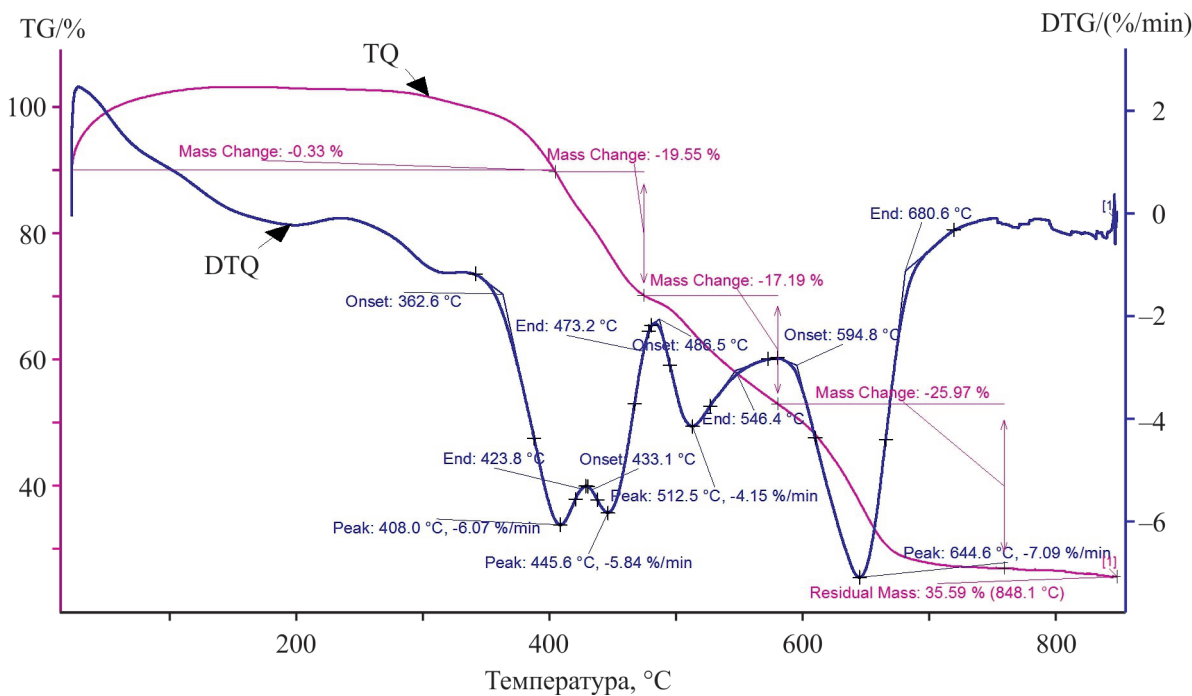
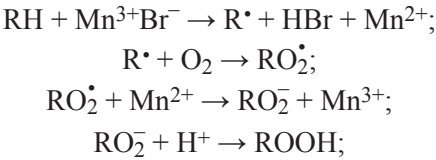
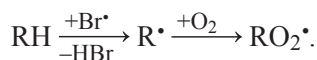
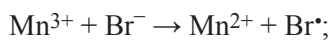


Рис. 2. Термограмма разложения бромбензоата Mn(II).

тельно-восстановительных реакциях: металл, отдавая 1 электрон, обеспечивает переход электрона, способствующего ускорению образования свободных радикалов, а бром в свою очередь ускоряет процесс передачи электрона. Воздействие двух образующихся ионов на процесс окисления УВ положительно сказывается на выходе конечных продук-

тов. В работе [14] предложен механизм совместного окислительного действия ион марганца и брома:





Ионы брома образуют с металлом комплекс ($\text{Me}^{3+} \dots \text{Br}$), что способствует ускорению лимитирующей стадии процесса — переносу электрона от субстрата к иону металла, находящемуся в более высоком валентном состоянии Me^{3+} .

Полученные при окислении деароматизированного дистиллята синтетические нефтяные кислоты были изучены методами ^1H ЯМР и ИК-спектроскопии. Спектр ^1H ЯМР (рис. 5), δ , м.д.: 0.70–0.92 (CH_3), 1.17 (CH_2), 1.50–2.00 (CH , CH_2 — нафтенy), 2.0–2.70 (по отношению к COOH группе $\alpha\text{-CH}_2$), 6.6–7.20 (ар., следы), 10.90 (COOH). ИК-спектр синтезируемого СНК, ν , cm^{-1} : 2952, 2923, 2855 с (CH), 3436 с (OH), 1706 с (C=O), 1234, 1174 с (C-O); δ , cm^{-1} : 1457, 1412, 1377 с (CH), 936 с (OH). Содержание, %: С 74.6; Н 10.6, О 14.8. Таким образом, была подтверждена возможность получения чистых синтетических нефтяных кислот описанным в работе способом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что жидкофазным окислением смеси нафтенoпарафиновых углеводородов деароматизированного масляного дистиллята, используемого для получения трансформаторного масла марки Т-1500, кислородом воздуха в присутствии бромбензоатов Mn(II) , Cr(III) и Co(II) , можно получать смесь промышленно важных синтетических нефтяных кислот с приемлемым выходом. Определены оптимальные условия получения нефтяных кислот в присутствии наиболее активного катализатора бромбензоата Mn(II) : длительность окисления должна при скорости подачи сырья 300 л/кг·ч и атмосферном давлении составлять 5 ч, концентрация катализатора 1 мас.%, температура 140°C. При таких условиях суммарный выход СНК составляет 46% в пересчете на исходное сырье. Непрореагировавший субстрат после отделения может быть повторно использован в процессе получения нефтяных кислот.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят сотрудника лаборатории «Жидкофазное окисление» Института нефтехимических процессов им. Ю. Г. Мамедалиева Министерства науки и образования Азербайджана А. А. Джафарову за помощь при подготовке статьи и ценные замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в Институте нефтехимических процессов им. Ю.Г. Мамедалиева Министерства науки и образования Азербайджана.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

А. С. Лядов входит в состав редакционной коллегии журнала «Наногетерогенный катализ», у других авторов конфликт интересов, требующий раскрытия, отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аббасов Вагиф Магеррам оглы, академик
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3822-6972>
Эфендиева Лала Магоммед кызы, д.х.н., доцент
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1043-3446>
Насибова Гюнай Гамбар кызы, к.х.н.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6738-3195>
Алиева Нушаба Муса кызы, к.х.н.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1253-9819>
Ахмедбекова Саида Фуад кызы, к.х.н.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1672-6394>
Черепнова Ютта Павловна, к.х.н.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6590-4797>
Мамедова Шафаг Разим кызы, н.с.
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0601-0229>
Лядов Антон Сергеевич, к.х.н.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9969-7706>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hannes P.L. Gemoets, Yuanhai Su, Minjing Sh.V.H., Luque R., Noël T. Liquid phase oxidation chemistry in continuous-flow microreactors // Chem. Soc. Rev. 2016. V. 45. P. 83–117.
<http://doi.org/10.1039/c5cs00447k>
- Andreea C.G., Bernard E.N. Catalytic oxidation of saturated hydrocarbons on multicomponent Au/Al₂O₃ catalysts // Catalysis Today. 2007. V. 119. N 1–4. P. 305–310.
<http://doi.org/10.1016/j.cattod.2006.08.034>
- Naruyoshi Komiya, Shun-Ichi Murahashi. Transition metal-catalyzed C–H oxidation of saturated hydrocarbons with molecular oxygen // Chem. Rec. 2021. V. 21. N 8. P. 1928–1940.
<http://doi.org/10.1002/tcr.202100154>
- Sutradhar M., Alegria E.C.B.A., Guedes da Silva M.F.C., Cai-Ming Liu, Armando J.L.P. Peroxidative oxidation of alkanes and alcohols under mild conditions by di- and tetranuclear copper(II) complexes of bis (2-hydroxybenzylidene) isophthalohydrazide // Molecules. 2018. V. 23. N 10. P. 2699.
<http://doi.org/10.3390/molecules2102699>
- Hermans I., Spier E.S., Neuenschwander U., Turra N., Baiker A. Selective Oxidation Catalysis Opportunities

- and Challenges // Topics in catalysis. 2009. V. 52. N 9. P. 1162–1174.
<http://doi.org/10.1007/s11244-009-9268-3>
6. Hosseinzadeh R., Mavvaji M., Tajbakhsh M., Lasemi Z., Aghili N. Selective Oxidation of Hydrocarbons and Alcohols Using Phen-MCM-41as an Efficient Co-Catalyst in Combination with NHPI-Based Nano-Magnetic Catalyst // New J. for Organic Synthesis. 2020. V. 52. N P. 99–109.
<http://doi.org/10.1080/00304948.2020.1716434>
 7. Аббасов В.М., Зейналов Э.Б., Велиев М.Г., Мустафаев С.А., Мамедова Н.А., Эфендиева Л.М., Шахмamedова А.Г. Природные нефтяные кислоты и производные на их основе: происхождение, структура и свойства, синтетические и прикладные аспекты. Баку: Элм, 2014. 232 с.
 8. Sadiyeva N.F., Nasibova G.G., Afandiyeva L.M., Cherepnova Y.P., Iskenderova S.A., Guliyeva E.M. Synthesis of cyclohexyl esters and fields of their application // Azerbaijan J. of Chemical New. 2023. V. 5. N 2. P. 4–12.
<http://doi.org/10.32010/AJCN04022023-4>
 9. Abbasov V.M., Aliyeva L.I., Afandiyeva L.M., Ibrahimov H.J., Rustamliet G.Y. Aerobic oxidation of naphthene-paraffinic hydrocarbons of petroleum in the presence of γ -Al₂O₃ modified by transition metals // PPOR. 2020. V. 21. N 1. P. 80–89.
 10. Zeynalov E.B., Allen N.S., Salmanova N., Vishnyakov V. Carbon nanotubes catalysis in liquid-phase aerobic oxidation of hydrocarbons: Influence of nanotube impurities // J. of Physics and Chemistry of Solids. 2019. V. 127. P. 245–251.
<https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2018.12.031>
 11. Suleymanova R.H., Zeynalov N.A., Badalova O.T., Qulubayova L.N., Guliyeva A.R., Mammadova U.A. Catalytic oxidation of oxygen containing aliphatic hydrocarbons in the presence of metalpolymer complexes // Chem. Problems. 2021. V. 19. N 2. P. 94–100.
<http://doi.org/10.32737/2221-8688-2021-2-94-100>
 12. Садиева Н.Ф., Насибова Г.Г., Искендерова С.А., Эфендиева Л.М., Черепнова Ю.П., Алиева С.Г., Мазамова Т.А. Синтез и исследование смешанных диэфиров синтетических нефтяных и жирных кислот // Журнал прикладной химии. 2023. Т. 96. № 4. С. 345–349 [Sadiyeva N.F., Nasibova G.G., Iskenderova S.A., Efendiyeva L.M., Cherepnova Yu. P., Aliyeva S.G., Mazamova T.A. Synthesis and Study of Mixed diesters of Synthetic Petroleum acids and Fatty Acids Russian // J. of Applied Chemistry. 2023. V. 96. N 4. P. 417–421.
<http://doi.org/10.1134/S1070427223040031>].
 13. Эфендиева Л.М., Агамалиева Д.Б., Рустамли Г.Ю., Бабанлы Н.Н., Насибова Г.Г., Ахмедбекова С.Ф., Аббасов В.М. Исследование бактерицид-ингибиторных свойств аминокэфиров, полученных на основе синтетических нефтяных кислот // Нефтепереработка и нефтехимия. 2020. № 8. С. 13–16.
 14. Потехин В.М., Потехин В.В. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки. СПб: Химиздат, 2005. 344 с.
 15. Насибова Г.Г., Алиева А.З., Зейналов Э.Б., Нуриев Л.Г., Агаев Б.К. Получение синтетических нефтяных кислот в присутствии бромированного углеродного нанокатализатора // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 2016. № 2. С. 50–52.
 16. Zeynalov E.B., Friedrich J.F., Hidde G., Ibrahimov H.J., Nasibova G.G. Brominated carbon nanotubes as effective catalysts for petroleum hydrocarbons aerobic oxidation // Erdöl Erdgas Kohle. 2012. V. 38. N 1. P. 45–48.
 17. Suresh A.K., Sharma M.M., Sridhar T. Engineering Aspects of Industrial Liquid-Phase Air Oxidation of Hydrocarbons // Industrial & Engineering Chem. Research. 2000. V. 39. N 11. P. 3958–3997.
<https://doi.org/10.1021/ie0002733>
 18. Industrial Organic Chemistry, 5th Edition. Hans-Jürgen Arpe, Stephen Hawkins (Translator). Wiley. 2010. ISBN: 978-3-527-32002-8. 525 pp.