

ЦИКЛОАЛКИЛИРОВАНИЕ ОРТО-ХЛОРФЕНОЛА С 1-МЕТИЛЦИКЛОАЛКЕНАМИ В ПРИСУТСТВИИ ФОСФОРСОДЕРЖАЩЕГО ЦЕОЛИТА

А.Х. Мовсумова, Ч.К. Расулов, Г.З. Гейдарли, Г.Д. Гасанова

Институт Нефтехимических Процессов им. Ю.Г. Мамедалиева Министерство Науки и Образования
Азербайджана, пр. Ходжалы, 30, г. Баку, AZ 1025

E-mail: movsumova85@gmail.com, rchk49@mail.ru, heyderligunay6@gmail.com, gulwen.hesenova@inbox.ru

В статье приводятся результаты исследований реакции циклоалкилирования о-хлорфенола с 1-метилциклопентеном и 1-метилциклогексеном с применением в качестве катализатора цеолита -Y, пропитанного ортофосфорной кислотой. Циклоалкилирование о-хлорфенола (ОХФ) с 1-метилциклоалкенами осуществляли на лабораторной установке периодического действия. После реакции алкилат отделяют от катализатора и ректифицируют. При ректификации сначала при атмосферном давлении отгоняли не вошедшие в реакцию циклены и ОХФ (до 200 °С), а затем под вакуумом (10 мм рт.ст.) выделяли целевой продукт реакции. С целью нахождения оптимальных условий, обеспечивающих максимальный выход 4-метилциклоалкил-2-хлорфенолов, исследовали влияние на выход и селективность температуры, время реакции, мольного соотношения о-хлорфенола к 1-метилциклоалкену и количеству катализатора. Температуру реакции варьировали в интервале 70-130 °С, продолжительность опытов 2-6 ч, мольное соотношение о-хлорфенола к 1-метилциклоалкену от 2:1 до 1:2 моль/моль, количество катализатора 5-15% на взятый о-хлорфенол. В результате исследования реакции циклоалкилирования орто-хлорфенола 1-метилциклопентеном и 1-метилциклогексеном с применением в качестве катализатора цеолит-Y, пропитанного ортофосфорной кислотой найдены оптимальные условия: температура реакции 110-115 °С, продолжительность опыта 4-5 ч, мольное соотношение о-хлорфенола к циклену 1:1, количество катализатора -10% в расчете на взятый о-хлорфенол. При этих условиях выход 4(1-метилциклоалкил)-2-хлорфенолов составляет 74,3-77,2% на взятый о-хлорфенол, а селективность 92,5-94,3% по целевому продукту. После выделения целевых продуктов от алкилата определены их физико-химические свойства, элементный состав, молекулярная масса, а также подтверждены химическое строение методами ИК и ¹H ЯМР спектроскопии.

Ключевые слова: о-хлорфенол, 1-метилциклопентен, 1-метилциклогексен, катализатор, циклоалкилирование, 4(1-метилциклопентил)-2-хлорфенол, 4(1-метилциклогексил)-2-хлорфенол

CYCLOALKYLATION OF ORTHOCHLOROPHENOL WITH 1-METHYLCYCLOALKENES IN THE PRESENCE OF PHOSPHORUS-CONTAINING ZEOLITE

A.Kh. Movsumova, Ch.K. Rasulov, G.Z. Haydarli, G.J. Hasanova

Y.H. Mammadaliyev's Institute of Petrochemical Processes of the Ministry of Science and Education, Khojaly
ave., 30, Baku, Azerbaijan, AZ1025

E-mail: movsumova85@gmail.com, rchk49@mail.ru, heyderligunay6@gmail.com, gulwen.hesenova@inbox.ru

The article presents the results of studies of the cycloalkylation reaction of o-chlorophenol with 1-methylcyclopentene and 1-methylcyclohexene using zeolite-Y as a catalyst, impregnated with orthophosphoric acid. Cycloalkylation of o-chlorophenol (OCP) with 1-methylcycloalkenes was carried out in a laboratory batch unit. After the reaction, the alkylate was separated from the catalyst and rectified. During rectification, unreacted cyclens and OCP were first distilled off at atmospheric pressure (up to 200 °C), and then the target reaction product was isolated under vac-

uum (10 mm Hg). In order to find optimal conditions that ensure maximum yield of 4-methylcycloalkyl-2-chlorophenols, the effect of temperature, reaction time, molar ratio of *o*-chlorophenol to 1-methylcycloalkene and the amount of catalyst on the yield and selectivity was studied. The reaction temperatures varied in the range 70-130 °C, the duration of the experiments was 2-6 h, the molar ratio of *o*-chlorophenol to 1-methylcycloalkene was from 2:1 to 1:2 mol/mol, the amount of catalyst was 5-15% per *o*-chlorophenol taken. As a result of studying the reaction of cycloalkylation of *ortho*-chlorophenol with 1-methylcyclopentene and 1-methylcyclohexene using zeolite-Y impregnated with orthophosphoric acid as a catalyst, the following optimal conditions were found: reaction temperature 110-115 °C, experiment duration 4-5 h, molar ratio of *o*-chlorophenol to cycloalken 1:1, amount of catalyst -10% based on *o*-chlorophenol taken. Under these conditions, the yield of 4(1-methylcycloalkyl)-2-chlorophenols is 74.3-77.2% for the *o*-chlorophenol taken, and the selectivity is 92.5-94.3% for the target product. After the isolation of the target products from the alkylate, their physicochemical properties, elemental composition, and molecular mass were determined, and their chemical structure was confirmed using IR and ¹H NMR spectroscopy.

Keywords: *o*-chlorophenol, 1-methylcyclopentene, 1-methylcyclohexene, catalyst, cycloalkylation, 4(1-methylcyclopentyl)-2-chlorophenol, 4(1-methylcyclohexyl)-2-chlorophenol

Для цитирования:

Мовсумова А.Х., Расулов Ч.К., Гейдарли Г.З., Гасанова Г.Д. Циклоалкилирование орто-хлорфенола с 1-метилциклоалкенами в присутствии фосфорсодержащего цеолита. *Рос. хим. жс. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2024. Т. LXVIII. № 3. С. 62–67. DOI: 10.6060/rcj.2024683.10.

For citation:

Movsumova A.Kh., Rasulov Ch.K., Haydarli G.Z., Hasanova G.J. Cycloalkylation of orthochlorophenol with 1-methylcycloalkenes in the presence of phosphorus-containing zeolite. *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N 3. P. 62–67. DOI: 10.6060/rcj.2024683.10.

ВВЕДЕНИЕ

Алкилфенолы широко применяются в качестве промежуточных продуктов для синтеза антиоксидантов, присадок, стабилизаторов и др. химических добавок к полиолефинам, синтетическим каучукам, маслам и топливам [1–8].

Получение алкилфенолов осуществляется путем алкилирования фенолов с различными алкилирующими агентами в присутствии кислотных катализаторов, в т.ч. серной и уксусной кислоты, кислого сернокислого натрия, КУ-2 в Н-форме и др. катализаторов [9–16]. Применение указанных катализаторов вызывает ряд технических трудностей, загрязнение сточных вод, образование побочных продуктов и отходов, а также большой расход катализатора [17–22].

В данной статье приведены результаты исследования реакции циклоалкилирования *o*-хлорфенола с 1-метилциклопентеном и 1-метилциклогексеном с применением в качестве катализатора цеолит-У, пропитанного ортофосфорной кислотой.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для получения 4(1-метилциклоалкил)-2-хлорфенолов использованы свежеперегнанный *o*-хлорфенол (ОХФ), 1-метилциклопентен (МЦП) с

$T_{\text{кип.}}=74-75\text{ }^{\circ}\text{C}$, $n_D^{20}=1.4347$, $\rho_4^{20}=0.7782$, чистотой 98% и 1-метилциклогексен (МЦГ) с $T_{\text{кип.}}=110-111\text{ }^{\circ}\text{C}$, $n_D^{20}=1.4500$, $\rho_4^{20}=0.8200$, чистотой 99.8%.

Катализатор приготовили по известной методике [23].

Циклоалкилирование *o*-хлорфенола (ОХФ) с 1-метилциклоалкенами осуществляли на лабораторной установке периодического действия. После реакции алкилат отделяют от катализатора и ректифицируют. При ректификации сначала при атмосферном давлении отгоняли не вошедшие в реакцию циклены и ОХФ (до 200 °C), а затем под вакуумом (10 мм рт.ст.) выделяли целевой продукт реакции и определяли их чистоту и физико-химические показатели. Структуры продуктов определяли с помощью спектральных методов и хроматографического анализа.

Структуру синтезированных 4(1-метилциклоалкил)-2-хлорфенолов определяли методом ИК и ¹H ЯМР спектроскопии. ИК спектры образца регистрировали на ИК Фурье-спектрометре Alpha (фирма Bruker Германии) в диапазоне волновых чисел 600-4000 см⁻¹. Спектры ¹H ЯМР снимали на приборе "Bruker WP-400" (¹H 400 МГц), внутренний стандарт -тетраметилсилан.

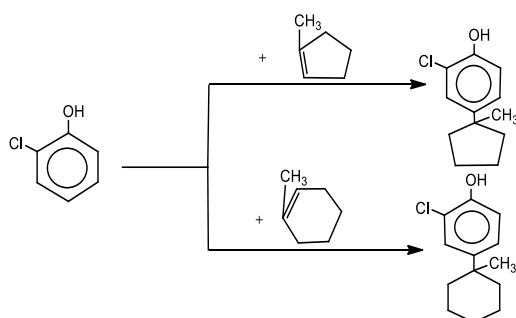
Плотность (ρ) исходных соединений и продуктов реакции определялась на аппарате "DMA

4500 М" (фирма Anton Paar) методом АСТМ D5002, показатель преломления (n) рефрактометрическим методом на приборе "Abbemat 500" (фирма Anton Paar).

Элементный состав синтезированных соединений определен при помощи анализатора марки Leco Eupore B.V. (Vouersweg 118-6161 Ag Geleen, Nederland; Postbus 1174-6160 BO Gellen).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Циклоалкилирование *o*-хлорфенола (ОХФ) с 1-метилциклоалкенами в присутствии фосфорсодержащего цеолита осуществляется по следующей схеме:



С целью нахождения оптимальных условий, обеспечивающих максимальный выход 4(1-метилциклоалкил)-2-хлорфенолов, изучали влияние

температуры, продолжительности опыта, мольного соотношения ОХФ к метилциклоалкену и количества катализатора на выход и состав продуктов реакции.

Температуру реакции варьировали в интервале 70-130 °С, продолжительность опытов 2-6 ч, мольное соотношение ОХФ к 1-метилциклоалкену от 2:1 до 1:2 моль/моль, количество катализатора 5-15 мас.% (в расчете на сырье).

На рис. 1 приведены результаты опытов по циклоалкилированию ОХФ 1-метилциклогексеном в присутствии цеолита-У, пропитанного ортофосфорной кислотой.

Как видно из рис. 1(а), при повышении температуры процесса от 40 до 115 °С выход 4(1-метилциклогексил)-2-хлорфенола увеличивается от 57,3 до 77,2% на взятый ОХФ. Дальнейшее увеличение температуры реакции до 140 °С не приводит к желаемому росту значений выходы и селективности целевого продукта. Низкое значение выхода и селективности при высоких температурах объясняется протеканием конкурентной реакции циклоалкилирования с образованием дизамещенных ОХФ. Таким образом, оптимальной можно считать температуру реакции 115 °С, при которой достигается наибольший выход целевого продукта (77,2%) и селективность (94,3%).

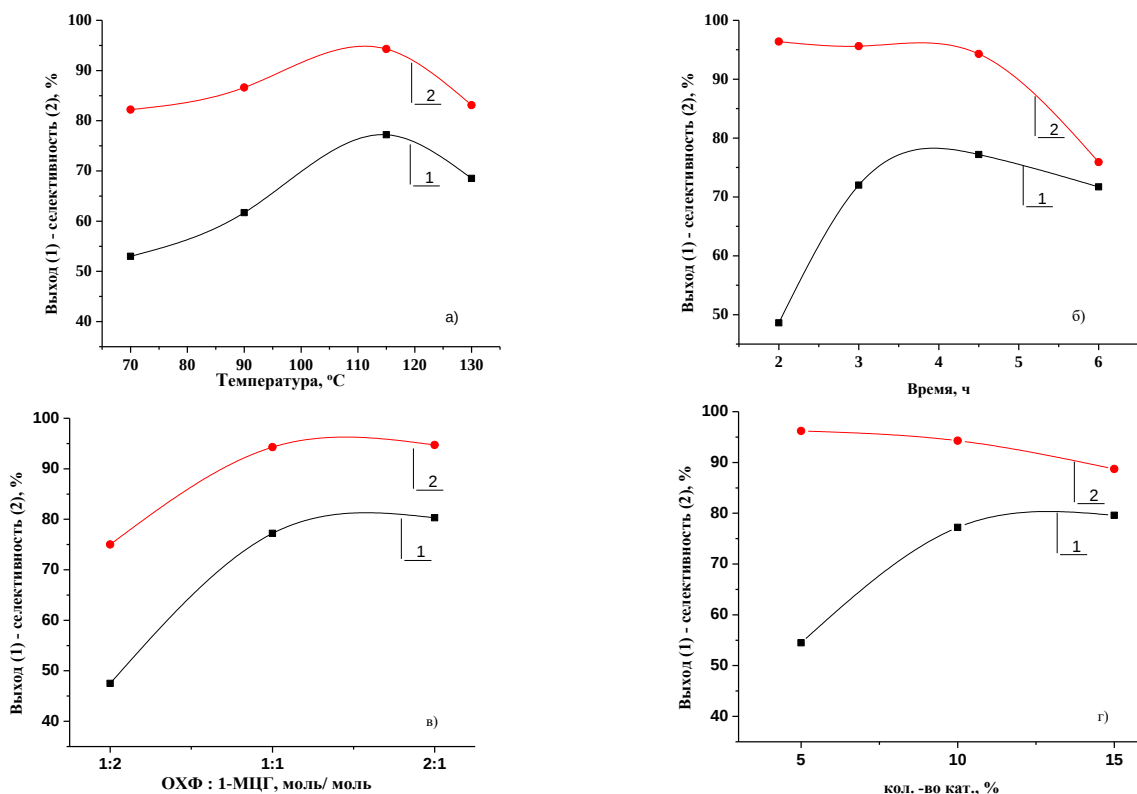


Рис. 1. Зависимость выхода (1) и селективности (2) 4(1-метилциклогексил)-2-хлорфенола от температуры (а), времени (б), мольного соотношения ОХФ к 1-МЦГ (в) и количества катализатора (г)

Из рис. видно, что время реакции циклоалкилирования, составляющая 5 ч, обеспечивает наибольшее значение выхода (77,2%) и селективности (94,3%). Продолжительность реакции в интервале 2-4 ч недостаточна для превращения исходных соединений в продукты реакции. С увеличением времени реакции до 6 ч выход целевого продукта и селективность падает; это объясняется образованием других изомеров ОХФ. Было изучено влияние мольного соотношения исходных компонентов на выход и селективность 4(1-метилциклогексил)-2-хлорфенола. Оптимальным условиям является мольное соотношение ОХФ к 1-метилциклогексену 1:1; при этом достигаются наибольшие значения выходы и селективности процесса получения целевого продукта. Дальнейшее увеличение количества ОХФ или циклена не дает положительных результатов. Исследование зависимости выхода и селективности продукта циклоалкилирования от количества катализатора показало, что избыток количества катализатора не представляется целесообразным как с экономической, так и технологической точек зрения. Избыток катализатора увеличивает так же площадь поверхности контакта сырья и катализатора, что способствует более глубокому протеканию реакции с образованием большего количества побочных продуктов. Поэтому оптимальным количеством катализатора будет считаться 10% на взятый ОХФ, при котором выход целевого продукта составляет 77,2%, а селективность 94,3%.

Таким образом, оптимальными условиями получения 4(1-метилциклогексил)-2-хлорфенола являются следующие: температура реакции 115 °С, продолжительность опыта 5 ч, мольное соотношение ОХФ:1-МЦГ=1:1 моль/моль, количество катализатора - 10% в расчете на взятый ОХФ. При этих

условиях выход целевого продукта составляет 77,2% (на взятый ОХФ), а селективность-94,3% по целевому продукту.

В ИК-спектре 4(1-метилциклогексил)-2-хлорфенола наблюдали следующие полосы поглощения (рис. 2): 654,705 cm^{-1} связь C-Cl, 809,879 cm^{-1} – 1,2,4 замещенное бензольное кольцо; 1063, 1114, 1171 cm^{-1} – деформационные колебания ОН группы в феноле; 1245, 1322 cm^{-1} – C-O связи в феноле; 3555 cm^{-1} – валентные колебания О-Н связи в О-Н группе; 1489 cm^{-1} – бензольное кольцо; 1597 cm^{-1} – C-C связь бензола; 1322, 1377, 1400, 1450 cm^{-1} – деформационные колебания CH_3 и CH_2 группы; 2856, 2923 cm^{-1} – валентные колебания CH_3 и CH_2 группы.

Результаты ^1H ЯМР спектроскопического исследования 4(1-метилциклогексил)-2-хлорфенола (CDCl_3 , δ , м.д.): 1.33 (синглет, 3Н, CH_3); 1.46-2.22 (мультиплет, 10Н, 5 CH_2); 2.33 (синглет, 3Н, CH_3); 4.61 (синглет, 1Н ОН); 6.82-6.85 (d, 1Н, аром.); 6.99-7.00 (d, 1Н, аром.); 7.2 (синглет, 1Н, аром.) (рис. 3.).

Аналогичные результаты получены и для 4(1-метилциклопентил)-2-хлорфенола: при оптимальном режиме выход целевого продукта составляет 74,3% от теории, селективность – 92,5% по целевому продукту.

ИК- и ^1H ЯМР спектры 4(1-метилциклопентил)-2-хлорфенола идентичны спектрам циклогексильного аналога. Только пятичленный цикл характеризуется полосами поглощения в области 2920, 2850 cm^{-1} (валентные колебания ОН-групп) и 1440 cm^{-1} (деформационные колебания СН-групп). Метильной группе соответствуют полосы при 1365 и 2940 cm^{-1} .

Физико-химические характеристики и элементный состав 4(1-метилциклоалкил)-2-хлорфенолов приведены в таблице.

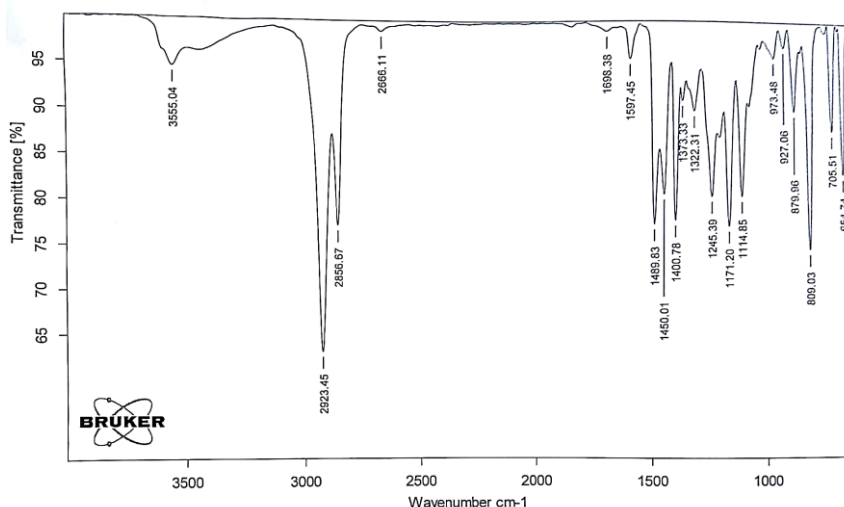
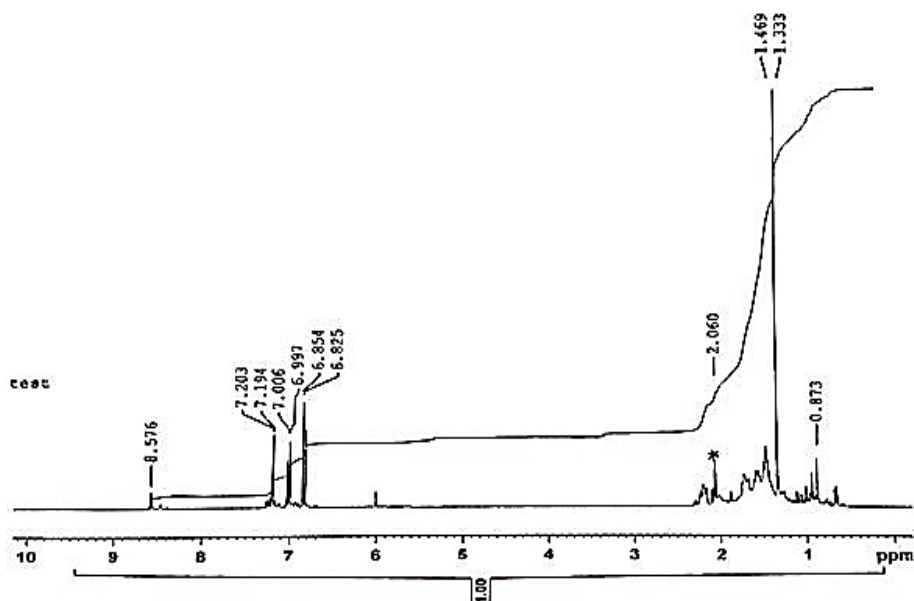
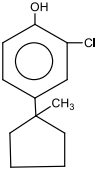
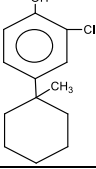


Рис. 2. ИК-спектр 4(1-метилциклогексил)-2-хлорфенола

Рис. 3. ^1H ЯМР спектр 4(1-метилциклогексил)-2-хлорфенола

Таблица

Физико-химические характеристики и элементный состав 4(1-метилциклогексил)-2-хлорфенолов

Структурная формула	$T_{\text{кип.}}^{\circ\text{C}}$ при 10 мм рт.ст.	n_D^{20}	ρ_4^{40}	Молек. масса		Элементный состав, %		
						Вычислено		
				Выч.	Найд.	Найдено		
						С	Н	Cl
	158-160	1,5190	1,0104	210,5	210	$\frac{68,6}{67,8}$	$\frac{7,1}{6,7}$	$\frac{16,7}{15,9}$
	163-165	1,5198	1,0185	224,5	224	$\frac{69,6}{68,7}$	$\frac{7,6}{7,3}$	$\frac{15,6}{14,8}$

Как видно из таблицы, найденные молекулярный вес, элементный состав 4(1-метилциклоалкил)-2-хлорфенолов соответствуют вычисленным.

ВЫВОД

Исследованы реакции циклоалкилирования *o*-хлорфенола 1-метилциклопентеном и 1-метилциклогексеном в присутствии цеолита-У, пропитанного ортофосфорной кислотой. Установлено, что при оптимальном режиме - температура реакции

110-115 °С, продолжительность опыта 4-5 ч, мольное соотношение ОХФ к циклену 1:1 моль/моль, количество катализатора - 10% - выход 4(1-метилциклоалкил)-2-хлорфенолов составляет 74,3-77,2% от теории, а селективность 92,5-94,3% по целевому продукту.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нагиева М.В., Расулов Ч.К., Агамалиев З.З., Алекперова И.И. НефтеГазохимия. 2018. № 4. С. 30–33. DOI: 10.24411/2310-8266-2018-10406.

REFERENCES

1. Nagieva M.V., Rasulov Ch.K., Agamaliyev Z.Z., Alekperova I.I. Petroleum and Gas Chemistry. 2018. N 4. P. 30–33. DOI: 10.24411/2310-8266-2018-10406.

2. Коробицына Л.Л., Величкина Л.М., Будаев Ж.Б., Шолитодов М.Р. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66. Вып. 11 С. 50–57. DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.4t.
3. Khamiyev M.J., Azizov A.H., Khanmetov A.A., Aliyeva R.V. Appl. Organometallic Chem. 2016. V. 31. N 4. P. 22–27. DOI: 10.1002/aoc.3692.
4. Shakhmuradov S.T. Chem. Problems. 2019. V. 17. N 4. P. 607–612. DOI: 10.32737/2221-8688-2019-4-607-612.
5. Гасанов А.А., Курбанлы У.Р., Расулов Ч.К., Гейдарли Г.З., Нагиева М.В. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва). 2022. Т. LXVI. № 4. С. 42–48. DOI: 10.6060/rcj.2022664.6.
6. Нагиева М.В., Расулов Ч.К. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66. № 6. С. 85–93. DOI: 10.6060/ivkkt.20236606.6777.
7. Шахмуратов С.Т., Расулов Ч.К., Мамедов А.М. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2024. Т. 67. № 1. С. 110–118. DOI: 10.6060/ivkkt.20246701.6787.
8. Krymkin N.Yu., Shakun V.A., Nesterova T.N., Naumkin P.V., Shuraev M.V. Ind. Eng. Chem. Res. 2016. V. 55. N 37. P. 9829–9839. DOI: 10.1021/acs.iecr.6b02067.
9. Сагдеев К.А., Хазипов М.Р., Галимова А.Т., Сагдеев А.А., Гумеров Ф.М., Яруллин Р.С. Катализ в хим. и нефтехим. пром-сти. 2015. № 6. С. 39–46. DOI: 10.18412/1816-0387-2015-6-39-46.
10. Баклан Н.С., Котов С.В., Смирнов Б.Ю. Вестн. ПНИПУ Хим. технология и биотехнология. 2021. № 2. С. 107–115. DOI: 10.15593/2224-9400/2021.2.09.
11. Фролов А.С., Курганова Е.А., Кошель Г.Н., Плахтинский В.В., Кабанова В.С. Вестн. Технол. ун-та. 2022. Т. 25. № 7. С. 79–87. DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_7_79.
12. Котов С.В., Тыщенко В.А., Зерзева И.М., Тарасов А.В., Тимофеева Г.В., Котова Н.С. Нефтехимия. 2017. Т. 57. № 2. С. 199–203. DOI: 10.7868/S0028242117020095.
13. Мурадов М.М., Муриудлу Н.А., Агаев А.А. Башкир. хим. журн. 2018. Т. 25. № 2. С. 31–34. DOI: 10.17122/bcj-2018-2-31-34.
14. Щаднева Н.А., Маякова Ю.Ю., Хуснутдинов Р.И. Вестн. Башкир. ун-та. 2021. Т. 26. № 3. С. 688–694. DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2021.3.27.
15. Chukicheva I.Y., Krylova M.V., Buravlev E.V., Kutchin A.V., Suponitskii K.Y. Russ. J. Org. Chem. 2014. V. 50. N 4. P. 589–595. DOI: 10.1134/S1070428014040241.
16. Нехаев А.И., Максимов А.Л. Нефтехимия. 2021. Т. 61. № 1. С. 21–42. DOI: 10.31857/S0028242121010020.
17. Zhiwei Y., Jinzhu Zh., Jing W., Riana G., Sihan L., Shenging Zh. Org. Biomol. Chem. 2014. 12. P. 2854–2858. DOI: 10.1039/c4ob00391h.
18. Расулов Ч. К., Гасанова Г.Дж. Вестник Башкирского государственного медицинского университета сетевое издание. 2024. № 1, г. С. 61–71.
19. Зиятдинова Г.К., Будников Г.К. Усп. химии. 2015. Т. 84. № 2. С. 194–224. DOI: 10.1070/RCR4436.
20. Zhao Z.C., Shi H., Wan C., Hu M.Y., Liu Y., Mei D., Camaioni D.M., Hu J.Z., Lercher J.A. J. Am. Chem. Soc. 2017. V. 139. N 27. P. 9178–9185. DOI: 10.1021/jacs.7b02153.
21. Maglinao R.L., Resurrection E.P., Kumar S., Maglinao A.L., Capareda S., Moser B.R. Indust. Eng. Chem. Res. 2019. V. 58. N 10. P. 4317–4330. DOI: 10.1021/acs.iecr.8b05188.
22. Леванова С.В., Лыженикова Т.А., Сушкова С.В. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2020. Т. 63. Вып. 8. С. 60–65. DOI: 10.6060/ivkkt.20206308.6180.
23. Расулов Ч.К., Азизов А.Г., Азимов Р.К., Абдуллаев Э.М., Абасов С.И. Нефтехимия. 2012. 52(5). С. 1–5.
2. Korobitsyna L.L., Velichkina L.M., Budaev Zh.B., Sholidodov M.R. Chemistry and chem. technology. 2023. V. 66. N 11. P. 50–57. DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.4t.
3. Khamiyev M.J., Azizov A.H., Khanmetov A.A., Aliyeva R.V. Appl. Organometallic Chem. 2016. V. 31. N 4. P. 22–27. DOI: 10.1002/aoc.3692.
4. Shakhmuradov S.T. Chem. Problems. 2019. V. 17. N 4. P. 607–612. DOI: 10.32737/2221-8688-2019-4-607-612.
5. Hesenov A.A., Qurbanli U.R., Rasulov Ch.K., Haydarli G.Z., Naghiyeva M.V. Ros. Khim. Zh. 2022. V. 66. N 4. P. 42–48. DOI: 10.6060/rcj.2022664.6.
6. Nagieva M.V., Rasulov Ch.K. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2023. V. 66. N 6. P. 85–93. DOI: 10.6060/ivkkt.20236606.6777.
7. Shakhmuradov S.T., Rasulov Ch.K., Mamedov A.M. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2024. V. 67. N 1. P. 110–118. DOI: 10.6060/ivkkt.20246701.6787.
8. Krymkin N.Yu., Shakun V.A., Nesterova T.N., Naumkin P.V., Shuraev M.V. Ind. Eng. Chem. Res. 2016. V. 55. N 37. P. 9829–9839. DOI: 10.1021/acs.iecr.6b02067.
9. Sagdeev K.A., Khazipov M.R., Galimova A.T., Sagdeev A.A., Gumerov F.M., Yarullin R.S. Catalysis in chemistry and petrochemical prom-sti. 2015. N 6. P. 39–46. DOI: 10.18412/1816-0387-2015-6-39-46.
10. Baklan N.S., Kotov S.V., Smirnov B.Y. PNIPU Chem. technology and biotechnology. 2021. N 2. P. 107–115. DOI: 10.15593/2224-9400/2021.2.09.
11. Frolov A.S., Kurganova E.A., Koshel G.N., Plakhtinsky V.V., Kabanova V.S. Vestn. Tekhnol. Univ. 2022. V. 25. N 7. P. 79–87. DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_7_79.
12. Kotov S.V., Tyshchenko V.A., Zerbeva I.M., Tarasov A.V., Timofeeva G.V., Kotova N.S. Petrochemistry. 2017. V. 57. N 2. P. 199–203. DOI: 10.7868/S0028242117020095.
13. Muradov M.M., Murshudlu N.A., Agaev A.A. Bashkir. Khim. Zhurn. 2018. V. 25. N 2. P. 31–34. DOI: 10.17122/bcj-2018-2-31-34.
14. Shchadneva N.A., Mayakova Y.Y., Khusnutdinov R.I. Vestn. Bashkir. Univ. 2021. V. 26. N 3. P. 688–694. DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2021.3.27.
15. Chukicheva I.Y., Krylova M.V., Buravlev E.V., Kutchin A.V., Suponitskii K.Y. Russ. J. Org. Chem. 2014. V. 50. N 4. P. 589–595. DOI: 10.1134/S1070428014040241.
16. Nekhaev A.I., Maksimov A.L. Petrochemistry. 2021. V. 61. N 1. P. 21–42. DOI: 10.31857/S0028242121010020.
17. Zhiwei Y., Jinzhu Zh., Jing W., Riana G., Sihan L., Shenging Zh. Org. Biomol. Chem. 2014. 12. P. 2854–2858. DOI: 10.1039/c4ob00391h.
18. Rasulov Ch.K., Hasanova G.Dj. Bulletin of the Bashkir State Medical University online publication. 2024. N 1. P. 61–71.
19. Ziyatdinova G.K., Budnikov G.K. Usp. chemistry. 2015. V. 84. N 2. P. 194–224. DOI: 10.1070/RCR4436.
20. Zhao Z.C., Shi H., Wan C., Hu M.Y., Liu Y., Mei D., Camaioni D.M., Hu J.Z., Lercher J.A. J. Am. Chem. Soc. 2017. V. 139. N 27. P. 9178–9185. DOI: 10.1021/jacs.7b02153.
21. Maglinao R.L., Resurrection E.P., Kumar S., Maglinao A.L., Capareda S., Moser B.R. Indust. Eng. Chem. Res. 2019. V. 58. N 10. P. 4317–4330. DOI: 10.1021/acs.iecr.8b05188.
22. Levanova S.V., Lyzhnikova T.A., Sushkova S.V. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2020. V. 63. N 8. P. 60–65. DOI: 10.6060/ivkkt.20206308.6180.
23. Rasulov Ch.K., Azizov A.G., Azimov R.K., Abdullaev E.M., Abasov S.I. Petrochemistry. 2012. 52(5). P. 1–5.

Поступила в редакцию (Received) 12.02.2024

Принята к опубликованию (Accepted) 18.04.2024