

УДК 547.493 + 547.426

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2020.4.7

СИНТЕЗ АЛКИЛМЕТИЛОВЫХ ЭФИРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ СПИРТОВ С ДИМЕТИЛКАРБОНАТОМ В ПРИСУТСТВИИ ЦЕОЛИТА FeHYmmm

© Н. А. Щаднева*, Ю. Ю. Маякова, Р. И. Хуснутдинов

Институт нефтехимии и катализа УФИЦ РАН
Россия, Республика Башкортостан, 450075 г. Уфа, пр. Октября, 141.

*Email: inklab4@gmail.com

Целью настоящего исследования являлась разработка высокоэффективных гетерогенных катализаторов на основе цеолитов без связующих, способствующих селективному метилированию спиртов с помощью диметилкарбоната. Установлено, что микро-, макро- и мезопористый цеолит без связующих FeHYmmm является эффективным катализатором метилирования первичных, вторичных и третичных спиртов диметилкарбонатом. Указанные цеолиты содержат мезо- и макропоры, которые создают условия для эффективной диффузии молекул субстрата к каталитически активным центрам и обратно к поверхности гранул. С другой стороны, концентрация активных центров указанных цеолитов без связующих веществ значительно выше, чем у цеолитов со связующими. Найдено, что FeHYmmm (5 масс. %) катализирует селективное метилирование первичных, вторичных и третичных спиртов диметилкарбонатом при 120 °С (1–3 ч) и мольном соотношении реагентов [спирт]:[ДМК] = 1:2 с образованием алкилметилового эфира с высокими выходами не зависимо от строения исходного спирта.

Ключевые слова: алкилметилловые эфиры, диметилкарбонат, спирты, метилирование, микро-, мезо- и макропористый цеолит FeHY без связующих.

Введение

Наиболее доступным представителем органических карбонатов является диметилкарбонат (ДМК), который широко применяется в органическом синтезе как метилирующий и карбоксиметилирующий агент. В отличие таких известных метилирующих агентов, как диметилсульфат, метилгалогениды, метанол ДМК менее токсичен [1–6]. Диметилкарбонат является эффективным метилирующим агентом для метилирования карбоновых кислот [7], алкил- и циклоалкиламинов [8–9] анилина и его производных [10–11], галогеналканов [12], тиолов и сульфонов [13–14], активных метиленовых соединений [15] и т.д.

В ряде работ исследовано взаимодействие диметилкарбоната со спиртами [16–18]. Реакция катализируется основным оксидом алюминия при 200 °С. При использовании в качестве катализаторов стехиометрических количеств H₂SO₄, AlCl₃ или FeCl₃ (90 °С, 19 ч), а также смешанных оксидов MgO/Al₂O₃ (120 °С, 4 ч), CaO-ZrO₂ (90 °С, 2 ч) или Al₂O₃/KF реакция протекает исключительно по карбонильному атому углерода, т.е. происходит переэтерификация ДМК и продуктами реакции являются алкилметил- и диалкилкарбонаты. Для успешного протекания реакции необходимы большой избыток ДМК (от 1:4 до 1:40) и стехиометрическое количество катализатора по отношению к спирту. В работах [19–22] установлено, что взаимодействие ДМК со спиртами (спирт: ДМК = 1:4) катализируют карбонилы кобальта и марганца в условиях: 180 °С, 1 ч, причем в зависимости от природы катализатора и строения спирта реакции идут в направлении метилирования и карбоксиметилирования.

Целью настоящей работы являлась разработка высокоэффективных гетерогенных катализаторов на основе цеолитов без связующих веществ, спо-

собствующих селективному метилированию спиртов диметилкарбонатом.

Результаты и обсуждение

В данной работе была исследована каталитическая активность цеолитных катализаторов (HYmmm, NaHYmmm, PbHYmmm, NiHYmmm, FeHYmmm), среди которых в реакции метилирования спиртов с помощью ДМК наиболее активным и селективно действующим является микро-, макро- и мезопористый цеолитный катализатор FeHYmmm (без связующих). Преимуществами Fe-цеолитного катализатора являются доступность, высокая селективность реакции по алкилметилового эфира, легкость выделения продуктов реакции и возможность их повторного использования.

Метилирование гексанола-1 проходит в мягких условиях: 120 °С, 1 ч в присутствии FeHYmmm (5 масс.%) при мольном соотношении реагентов [1-гексанола]:[Me₂CO₃] = 1:2–1:4 с образованием гексилметилового эфира с количественным выходом. Установлено, что температура реакции оказывает существенное влияние на выход целевых продуктов (схема 1).

В найденных условиях осуществлено метилирование первичных спиртов с помощью ДМК, приводящее к образованию целевых алкилметилового спиртов с высоким выходом и селективностью (95–99%). Диметилкарбонат в реакциях используется в количестве 2–3 эквивалентов по отношению к спиртам, он является одновременно реагентом и растворителем. Переэтерификация и алкилирование по алкильному радикалу не наблюдались. Образование карбонатов при использовании FeHYmmm не происходит (схема 2).

Схема 1

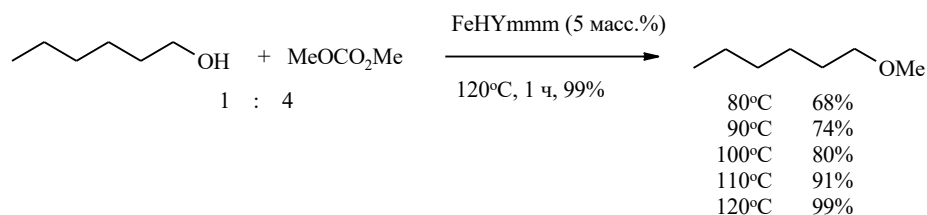


Схема 2

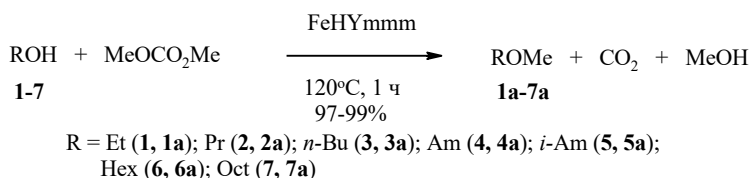


Схема 3

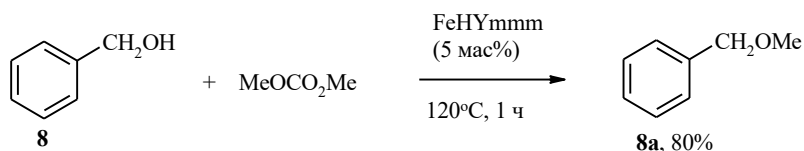


Схема 4

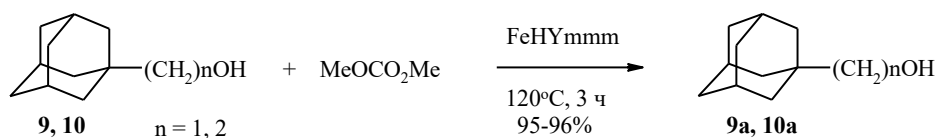
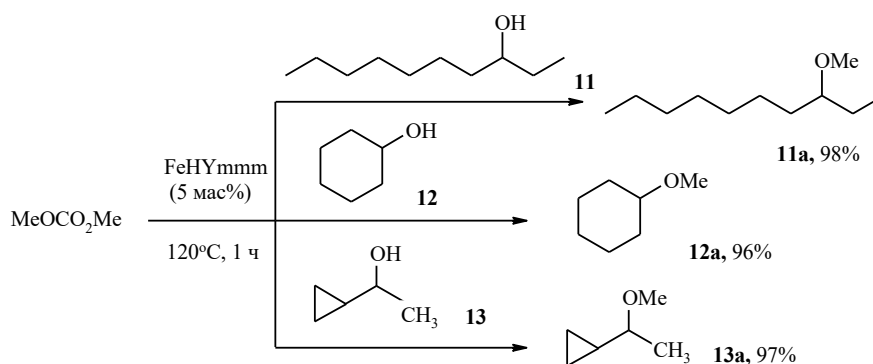


Схема 5



Достаточно активно в типичных условиях в присутствии FeHYmmm реагируют с ДМК первичные спирты с объемными заместителями. Так, при взаимодействии бензильного спирта **8** с ДМК образуется бензилметильный эфир с выходом 80% (схема 3).

Для полного превращения 1-адамантилметанола **9** и 1-адамантилэтанола **10** в соответствующие [(1-адамантил)метил]- и [(1-адамантил)этил]-метильные эфиры (**9a** и **10a**) требуется более длительное нагревание (схема 4).

Вторичные спирты **11–13** реагируют с диметилкарбонатом в присутствии FeHYmmm (120 °С, 1 ч), образуя алкилметильные эфиры **11a–13a** с высокими выходами (схема 5).

Трет-бутиловый спирт **14** реагирует с ДМК с образованием метил-трет-бутилового эфира **14a** с

количественным выходом. Гладко, с сохранением циклопропановых колец проходит метилирование 1,1-дициклопропилэтанола **15**, единственным продуктом реакции является метильный эфир **15a**, полученный с выходом 98% (схема 6).

Реакции адамантан-1-ола **16** и 5-гидроксиадамантан-2-она **17** с диметилкарбонатом в присутствии (5 мас%) FeHYmmm проходят при 130 °С за более длительное время (3 ч) с образованием 1-метоксиадамантана **16a** и 5-метоксиадамантан-2-она **17a** с умеренными выходами (схема 7).

Более объемная молекула диамтананола-1 **18** в найденных условиях образует метильный эфир диамтананола-1 **18a** с выходом 78% (схема 8).

Схема 6

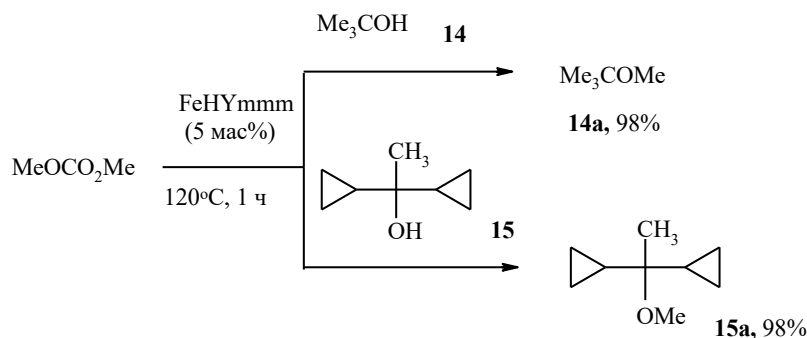


Схема 7

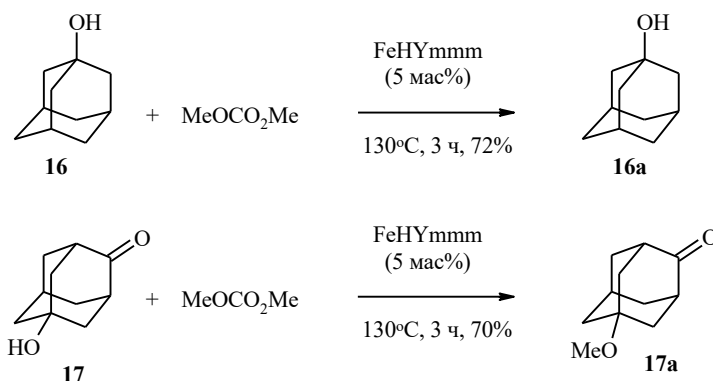
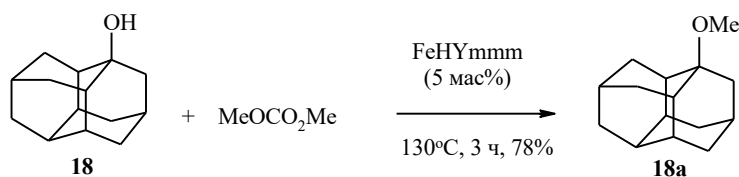


Схема 8



Установлено, что длина и объем алкильного и циклоалкильного радикала не оказывают заметного влияния на выход эфиров **1a–18a**.

Экспериментальная часть

Материалы и реагенты. В качестве исходных реагентов использовали спирты этанол, пропанол-1, бутанол-1, амиловый и изоамиловые спирты, гексанол-1, октанол-1, бензиловый спирт, 1-адамантилметанол-1, 1-адамантилэтанол, деканол-3, циклогексанол, *трет*-бутанол, 1,1-метилциклопропиловый и 1,1-дициклопропиловые спирты, адамантанол-1, 5-гидроксиадамантан-2-он фирмы Acros Organics), которые перед применением перегоняли или кристаллизовали (этанол-гексан). Диамантанол-1 получали по методике [23].

Методика приготовления цеолитного катализатора FeHYmmm. Катализатор готовили пропиткой соответствующего цеолита HYmmm, не содержащего связующих веществ раствором Fe(NO₃)₃·9H₂O с последующей термообработкой в двух режимах: при 150 °C (4 ч) и при 450 °C (3 ч).

Полученные таким методом образцы катализатора содержали Fe₂O₃ 3–5% мас. [24–25].

Общая методика метилирования спиртов диметилкарбонатом. Реакции проводили в нержавеющей автоклаве емкостью 17 мл. В стеклянную ампулу помещали 5 мас% FeHYmmm, 10 ммоль спирта, 20–40 ммоль ДМК, ампулу запаивали, помещали в автоклав, автоклав герметично закрывали, при постоянном перемешивании нагревали при 120 °C в течение 1–3 ч. По окончании реакции автоклав охлаждали, ампулу вскрывали, реакционную массу пропускали через слой силикагеля, избыток ДМК отгоняли, остаток перегоняли или кристаллизовали из смеси этанол:гексан (1:5). Чистоту полученных продуктов реакции анализировали методом ГЖХ.

Строение синтезированных алкилметилвых эфиров доказано методами ЯМР, масс-спектрометрии, а также с заведомо полученными образцами и литературными данными.

1-(Метоксиметил)адамантан (9a). Выход 96%, т.кип. 90.5 °C (3 мм рт. ст.). Спектр ЯМР ¹³C, δ, м.д.: 30.61 (C^{3,5,7}), 32.43 (C¹), 38.08 (C^{4,6,9}), 39.45

(C^{2,8,10}), 58.32 (OMe), 81.43 (CH₂O). Найдено, %: С 78.32; Н 11.05. С₁₂H₂₀O. Вычислено, %: С 79.94; Н 11.18. *M* 180.28.

1-(2-Метоксиэтил)адамтан (10a). Выход 95%, т.кип. 108–108.5 °С (4 мм рт. ст.). Спектр ЯМР ¹³С, δ, м.д.: 28.79 (C^{3,5,7}), 32.34 (C¹), 37.68 (C^{4,6,9}), 43.07 (C^{2,8,10}), 40.82 (C–CH₂), 58.52 (OMe), 69.99 (CH₂O). Найдено, %: С 79.32; Н 11.25. С₁₃H₂₂O. Вычислено, %: С 80.35; Н 11.41. *M* 194.31.

1,1-Дициклопропилметоксиэтан (15a). Выход ~100%, т.кип. 67–67.5 °С (10 мм рт.ст.). Спектр ЯМР ¹³С, δ, м.д.: 0.07 (C², циклопропил), 0.10 (C^{2'}, циклопропил), 4.27 (C^{3'}, циклопропил), 5.34 (C³, циклопропил), 17.83 (C^{1,1'}, циклопропил), 20.48 (CH₃), 54.51 (ОСН₃), 75.10 (C–O). Найдено, %: С 77.02; Н 11.45. С₉H₁₆O. Вычислено, %: С 77.09; Н 11.50. *M* 140.22.

1-Метоксиадамтан (16a). 80 %, т. кип 67–68 °С/3.0 мм рт.ст. {67–68 °С/3 мм рт. ст. [1]}; ¹H-ЯМР (400 МГц, CDCl₃): δ 1.53–1.66 (м, 6 H, CH₂), 1.71 (с, 6 H, CH₂), 2.13 (с, 3 H, CH), 3.21 (с, 3H, ОСН₃). Спектр ЯМР ¹³С, δ, м.д.: 30.51 (C¹, C³, C⁵), 36.65 (C⁴, C⁶, C¹⁰), 41.32 (C², C⁸, C⁹), 47.58 (ОСН₃), 73.68 (C¹).

1-Метоксиадамтан-4-он (17a). Выход 95%, т.субл. 95–96 °С/5 мм рт.ст. Спектр ЯМР ¹³С, δ, м.д.: 30.29 (C⁷), 38.27 (C^{8,10}), 40.36 (C⁶), 42.58 (C^{4,9}), 48.30 (C^{1,3}), 48.46 (ОСН₃), 69.76 (C⁵), 216.55 (C²). Найдено, %: С 73.15; Н 8.90. С₁₁H₁₆O₂. Вычислено, %: С 73.30; Н 8.95.

1-Метоксиадамтан (18a). Выход 78%, т.пл. 116–116.5 °С (этанол–гексан). Спектр ЯМР ¹³С, δ, м.д.: 24.95 (C₄), 29.61 (C₉), 31.99 (C₃, C₁₄), 36.83 (C₆), 37.31 (C₈, C₁₀), 38.89 (C₅), 39.24 (C₁₃), , 39.67 (C₇, C₁₁), 46.46 (C₂, C₁₂), 47.52 (ОСН₃), 73.68 (C₁). Найдено, %: С 82.22; Н 9.85. С₁₅H₂₂O. Вычислено, %: С 82.52; Н 10.16. *M* 218.334.

Выводы

Таким образом, цеолитный катализатор FeHYmmm без связующих веществ активно катализирует селективно взаимодействие первичных, вторичных и третичных спиртов различной структуры с помощью диметилкарбоната с образованием соответствующих алкилметиловых эфиров с высокими выходами.

Результаты получены при финансовой поддержке РФ в лице Минобрнауки России Грантом ФЦП №2019-05-595-000-058 с использованием оборудования ЦКП «Агидель» УФИЦ РАН.

Работа выполнена в рамках государственного задания РФ рег. №АААА-А19-119022290009-3.

ЛИТЕРАТУРА

- Kumar P., Srivastava V. C., Stangar U. L., Music B., Mishra M., Meng Y. Resent process in dimethyl carbonate synthesis using different feedstock and techniques in the presence of heterogeneous catalysts // *Catal. Rev.* 2019. Pp. 1–59. DOI: 10.1080/01614940.2019.1696609.
- Dhana L. D., Srinivasa R. B., Lingaiah N. Synthesis of dimethyl carbonate from methanol and urea over zink–strontia mixed oxide catalysts // *Catal. Commun.* 2019. Vol. 122. Pp. 1–4.
- Goodrich P., Gunaratne H. Q. N., Jin L., Lei Y., Seddon K. R. Carbon Dioxide Utilisation for the Synthesis of Unsymmetrical Dialkyl and Cyclic Carbonates Promoted by Basic Ionic Liquids // *Austr. J. Chem.* 2018. Vol. 71. No. 3. Pp. 181–185.
- Tan H.-Z., Wang Z.-Q., Xu Z.-N., Sun J., Xu Y.-P., Chen Q.-S., Chen Y., Guo G.-C. Review on the synthesis of dimethyl carbonate // *Catal Today.* 2018. Vol. 312. Pp. 2–12.
- Tundo P., Musolino M., Arico F. The reactions of dimethyl carbonate and its derivatives. // *Green Chem.* 2018. Vol. 20. No. 1. Pp. 28–85.
- Fiorani G., Perosa A., Selva M. Dimethyl carbonate: a versatile reagent for a sustainable valorization of renewables // *Green Chem.* 2018. Vol. 20. No. 2. Pp. 277–556.
- Khusnutdinov R. I., Shchadneva N. A., Mayakova Yu. Yu. Methylation of Aliphatic and Aromatic Carboxylic Acids with Dimethyl Carbonate under the Influence of Manganese and Iron Carbonyls // *Russ. J. Gen. Chem.* 2018. Vol. 88. No. 1. Pp. 15–19.
- Selva M., Tundo P. Selective N-methylation of primary aliphatic amines with dimethyl carbonate in the presence of alkali cation exchanged Y-faujasites // *Tetrahedron Lett.* 2003. Vol. 44. No. 44. Pp. 8139–8142.
- Khusnutdinov R. I., Shchadneva N. A., Mayakova Yu. Yu., Egorova T. M., Khazipova A. N., Kutepov B. I. Methylation of Cycloalkanamines with Dimethyl Carbonate in the Presence of Binger-Free NaY Zeolite // *Russ. J. Org. Chem.* 2018, Vol. 54. No. 4. Pp. 654–656.
- Rojas-Buzo S., García-García P., Corma A. Zr-MOF-808@MCM-41 catalyzed phosgene-free synthesis of polyurethane precursors // *Catal. Sci. Technol.* 2019. Vol. 9. No. 1. Pp. 146–156.
- Khusnutdinov R. I., Shchadneva N. A., Mayakova Yu. Yu., Abdrakhmanov A. N., Khazipova A. N., Kutepov B. I. Methylation of Aniline and Its Derivatives with Dimethyl Carbonate under the Action of Zeolite FeHy-mmm // *Russ. J. Org. Chem.* 2019, Vol. 55. No. 8. Pp. 1085–1087.
- Khusnutdinov R. I., Shchadneva N. A., Mayakova Yu. Yu. Synthesis of 1-, 2-Methoxy-, 1,3-Dimethoxyadamantanes and 1-, 4-Methoxydiadamantanes by Reaction of Adamantyl and Diamantyl Halides with Dimethyl carbonate in the Presence of Zeolite Catalysts // *Russ. J. Org. Chem.* 2018. Vol. 54. No. 11. Pp. 1728–1730.
- Jian-Gang X., Quan J., Shu-Bai L., Zheng Y., Li-Min Z. SH-Methylation of SH-containing heterocycles with dimethyl carbonate via phase-transfer catalytic reaction // *Synth. Commun.* 2011. Vol. 41. No. 6. Pp. 871–878.
- Wang M., Zhao J., Jiang X. Aryl Methyl Sulfone Construction from Eco-Friendly Inorganic Sulfur Dioxide and Methyl Reagents *ChemSusChem.* 2019. Vol. 12. No. 13. Pp. 3064–3068.
- Tundo P. Selective monomethylation reactions of methyleneactive compounds with dimethylcarbonate. An example of clean synthesis // *Pure Appl. Chem.* 2000. Vol. 72. No. 9. Pp. 1793–1797.
- Jin S., Hunt A. J., Clark J. H., McElroy C. R. Acid-catalysed carboxymethylation, methylation and dehydration of alcohols and phenols with dimethyl carbonate under mild conditions // *Green Chem.* 2016. Vol. 18. No. 21. Pp. 5839–5844.
- Zhang X., Wang D., Ma J., Wei W. Fluorinated Mg-Al Hydrotalcites Derived Basic Catalysts for Transesterification of Glycerol with Dimethyl Carbonate // *Catal Lett.* 2017. Vol. 147. No. 5. Pp. 1181–1196.
- Zhang X., Wei S., Zhao X., Chen Z., Wu H., Rong P., Sun Y., Li Y., Yu H., Wang D. Preparation of mesoporous CaO-ZrO₂ catalysts without template for the continuous synthesis of glycerol carbonate in fixed-bed reactor // *Appl. Catal. A, Gen.* 2020. Vol. 590. Pp. 117313–117325.

19. Koledina K. F., Koledin S. N., Shchadneva N. A., Mayakova Yu. Yu., Gubaydullin I. M. Kinetic model of the catalytic reaction of dimethyl carbonate with alcohols in the presence of $\text{Co}_2(\text{CO})_8$ and $\text{W}(\text{CO})_6$ // *Reac. Kinet. Mech. Cat.* Published online: 10 April 2017. DOI 10.1007/s11144-017-1181-3.
20. Khusnutdinov R. I., Shchadneva N. A., Mayakova Yu. Yu. Reaction of Diols with Dimethyl Carbonate in the Presence of $\text{W}(\text{CO})_6$ and $\text{Co}_2(\text{CO})_8$ // *Russ. J. Org. Chem.* 2014. Vol. 50. No. 7. Pp. 948–952.
21. Khusnutdinov R. I., Shchadneva N. A., Mayakova Yu. Yu., Raskil'dina G. Z., Zlotskii S. S. Methylation and Carboxymethylation of Oxyalkyl-1,3-dioxacycloalkanes with Dimethyl Carbonate Catalyzed by $\text{W}(\text{CO})_6$ and $\text{Mn}_2(\text{CO})_{10}$ // *Russ. J. Gen. Chem.* 2015. Vol. 85. No. 8. Pp. 1826–1829.
22. Koledina K. F., Koledin S. N., Shchadneva N. A., Gubaidullin I. M. Kinetics and Mechanism of the Catalytic Reaction between Alcohols and Dimethyl Carbonate // *Russ. J. Phys. Chem. A*, 2017. Vol. 91. No. 3. Pp. 442–447.
23. Kislitsina K. S., Shadneva N. A., Khusnutdinov R. I. Oxidation of Adamantane with $\text{H}_2\text{O}_2\text{-CF}_3\text{COCF}_3\cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$ in the Presence of $\text{VO}(\text{acac})_2$ // *Russ. J. Org. Chem.* 2018. Vol. 54. No. 7. Pp. 992–995.
24. Павлов М. Л., Травкина О. С., Кутепов Б. И., Павлова И. Н., Хазипова А. Н. Способ получения высокомолекулярного фожазита без связующих веществ. Патент РФ №2456238. Оpubл. 20.07.2012, бюл. №12.
25. Kutevov B. I., Travkina O. S., Pavlova I. N., Khazinova A. N., Grigor'eva N. G., Pavlov M. L. New Adsorbents and Acid-Base Catalysts Based on Binger-Free Granulated Zeolites Of LTA and FAU Types // *Russ. J. Appl. Chem.* 2015. Vol. 88. No. 1. Pp. 65–71.

Поступила в редакцию 22.07.2020 г.

После доработки – 02.12.2020 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2020.4.7

**SYNTHESIS OF ALKYL METHYL ETHERS VIA THE INTERACTION
BETWEEN ALCOHOLS AND DIMETHYL CARBONATE
IN THE PRESENCE OF FeHY_{mmm} ZEOLITE**

© N. A. Shchadneva*, Yu. Yu. Mayakova, R. I. Khusnutdinov

*Institute of Petrochemistry and Catalysis, Ufa Federal Research Center of RAS
141 Oktyabrya Avenue, 450075 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

*Email: inklab4@gmail.com

In recent years, Green chemistry methods, which reduce the harmful effects of chemical processes on the environment, have been intensively developed. The use of reagents that are not toxic to the environment is one of the most important tools for Green Chemistry. One such reagent is dimethyl carbonate (DMC), an effective environmentally benign substitute for toxic methyl halides (MeX, X = I, Br, Cl) and phosgene (COCl₂ – carbonyl dichloride). DMC is less toxic; during the reaction, it does not produce inorganic salts since the leaving group is methyl carbonate, which decomposes forming methanol and CO₂. The reactivity of DMC is moderate; therefore, the reaction is carried out in the presence of a catalyst. The reaction of DMC and alcohols leads to the formation of alkyl methyl ethers, which are widely used in practice as solvents, intermediates in the synthesis of drugs, herbicides, antifreezes, etc. This study aims at developing highly efficient heterogeneous catalysts based on binder-free zeolites, which promote the selective methylation of primary, secondary, and tertiary alcohols using dimethyl carbonate. Micro-, macro-, or mesoporous binder-free zeolite FeHY_{mmm} was found to be the efficient catalyst for the methylation of primary, secondary, and tertiary alcohols with dimethyl carbonate. The advantage of this catalyst is the presence of meso- and macropores, which provide efficient diffusion of the reactant molecules between the catalytic centers and the surface of the catalyst granules. The concentration of active sites in catalysts without a binder is much higher than that of catalysts with a binder. It was found that FeHY_{mmm} zeolite (5 wt.%) catalyzes the selective methylation of primary, secondary, and tertiary alcohols (120 °C, 1 h, [alcohol]:[DMC] = 1:2) to produce alkyl methyl ethers with high yields regardless of the original alcohol structure.

Keywords: alkyl methyl ethers, dimethyl carbonate, alcohols, methylation, iron(III) nitrate, microporous zeolite, mesoporous zeolite, macroporous zeolite, FeHY zeolite.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Kumar P., Srivastava V. C., Stangar U. L., Music B., Mishra M., Meng Y. *Catal. Rev.* 2019. Pp. 1–59. DOI: 10.1080/01614940.2019.1696609.
2. Dhana L. D., Srinivasa R. B., Lingaiah N. *Catal. Commun.* 2019. Vol. 122. Pp. 1–4.
3. Goodrich P., Gunaratne H. Q. N., Jin L., Lei Y., Seddon K. R. *Austr. J. Chem.* 2018. Vol. 71. No. 3. Pp. 181–185.
4. Tan H.-Z., Wang Z.-Q., Xu Z.-N., Sun J., Xu Y.-P., Chen Q.-S., Chen Y., Guo G.-C. *Catal Today.* 2018. Vol. 312. Pp. 2–12.
5. Tundo P., Musolino M., Arico F. *Green Chem.* 2018. Vol. 20. No. 1. Pp. 28–85.
6. Fiorani G., Perosa A., Selva M. *Green Chem.* 2018. Vol. 20. No. 2. Pp. 277–556.
7. Khusnutdinov R. I., Shchadneva N. A., Mayakova Yu. Yu. *Russ. J. Gen. Chem.* 2018. Vol. 88. No. 1. Pp. 15–19.
8. Selva M., Tundo P. *Tetrahedron Lett.* 2003. Vol. 44. No. 44. Pp. 8139–8142.
9. Khusnutdinov R. I., Shchadneva N. A., Mayakova Yu. Yu., Egorova T. M., Khazipova A. N., Kutepov B. I. *Russ. J. Org. Chem.* 2018, Vol. 54. No. 4. Pp. 654–656.
10. Rojas-Buzo S., García-García P., Corma A. *Catal. Sci. Technol.* 2019. Vol. 9. No. 1. Pp. 146–156.
11. Khusnutdinov R. I., Shchadneva N. A., Mayakova Yu. Yu., Abdrakhmanov A. N., Khazipova A. N., Kutepov B. I. *Russ. J. Org. Chem.* 2019, Vol. 55. No. 8. Pp. 1085–1087.
12. Khusnutdinov R. I., Shchadneva N. A., Mayakova Yu. Yu. *Russ. J. Org. Chem.* 2018. Vol. 54. No. 11. Pp. 1728–1730.
13. Jian-Gang X., Quan J., Shu-Bai L., Zheng Y., Li-Min Z. *Synth. Commun.* 2011. Vol. 41. No. 6. Pp. 871–878.
14. Wang M., Zhao J., Jiang X. *Aryl Methyl Sulfone Construction from Eco-Friendly Inorganic Sulfur Dioxide and Methyl Reagents ChemSusChem.* 2019. Vol. 12. No. 13. Pp. 3064–3068.

15. Tundo P. Pure Appl. Chem. 2000. Vol. 72. No. 9. Pp. 1793–1797.
16. Jin S., Hunt A. J., Clark J. H., McElroy C. R. Green Chem. 2016. Vol. 18. No. 21. Pp. 5839–5844.
17. Zhang X., Wang D., Ma J., Wei W. Catal Lett. 2017. Vol. 147. No. 5. Pp. 1181–1196.
18. Zhang X., Wei S., Zhao X., Chen Z., Wu H., Rong P., Sun Y., Li Y., Yu H., Wang D. Appl. Catal. A, Gen. 2020. Vol. 590. Pp. 117313–117325.
19. Koledina K. F., Koledin S. N., Shchadneva N. A., Mayakova Yu. Yu. Gubaydullin I. M. Reac. Kinet. Mech. Cat. Published online: 10 April 2017. DOI 10.1007/s11144-017-1181-3.
20. Khusnutdinov R. I., Shchadneva N. A., Mayakova Yu. Yu. Russ. J. Org. Chem. 2014. Vol. 50. No. 7. Pp. 948–952.
21. Khusnutdinov R. I., Shchadneva N. A., Mayakova Yu. Yu., Raskil'dina G. Z., Zlotskii S. S. Russ. J. Gen. Chem. 2015. Vol. 85. No. 8. Pp. 1826–1829.
22. Koledina K. F., Koledin S. N., Shchadneva N. A., Gubaidullin I. M. Russ. J. Phys. Chem. A, 2017. Vol. 91. No. 3. Pp. 442–447.
23. Kislitsina K. S., Shadneva N. A., Khusnutdinov R. I. Russ. J. Org. Chem. 2018. Vol. 54. No. 7. Pp. 992–995.
24. Pavlov M. L., Travkina O. S., Kutepov B. I., Pavlova I. N., Khazipova A. N. Sposob polucheniya vysokomodul'nogo fozhazita bez svyazuyushchikh veshchestv. Patent RF No. 2456238. Opubl. 20.07.2012, byul. No. 12.
25. Kutepov B. I., Travkina O. S., Pavlova I. N., Khazinova A. N., Grigor'eva N. G., Pavlov M. L. Russ. J. Appl. Chem. 2015. Vol. 88. No. 1. Pp. 65–71.

Received 22.07.2020.

Revised 02.12.2020.