

УДК 547-30 + 662.7 + 661.71
AGRIS P33

<https://doi.org/10.33619/10.33619/2414-2948/48/04>

Ru-СОДЕРЖАЩИЕ КАТАЛИЗАТОРЫ ДЛЯ ЖИДКОФАЗНОГО СИНТЕЗА ФИШЕРА-ТРОПША

©*Маркова М. Е.*, Тверской государственный университет,
г. Тверь, Россия, mashulikmarkova@gmail.com

©*Степачева А. А.*, ORCID: 0000-0001-9366-5201, SPIN-код: 6628-9111, канд. хим. наук,
Тверской государственный технический университет,
г. Тверь, Россия, a.a.stepacheva@mail.ru

©*Гавриленко А. В.*, Тверской государственный технический университет,
г. Тверь, Россия, science@science.tver.ru

©*Петухова И. Д.*, Тверской государственный технический университет,
г. Тверь, Россия, science@science.tver.ru

Ru-CONTAINING CATALYSTS FOR LIQUID-PHASE FISCHER-TROPSCH SYNTHESIS

©*Markova M.*, Tver State University, Tver, Russia, mashulikmarkova@gmail.com

©*Stepacheva A.*, ORCID: 0000-0001-9366-5201, SPIN-code: 6628-9111, Ph.D.,
Tver State Technical University, Tver, Russia, a.a.stepacheva@mail.ru

©*Gavrilenko A.*, SPIN-code: 8279-7834, Ph.D., Tver State Technical University,
Tver, Russia, science@science.tver.ru

©*Petukhova I.*, Tver State Technical University, Tver, Russia, science@science.tver.ru

Аннотация. Поиск новых стабильных и активных катализаторов синтеза Фишера-Тропша является одним из основных направлений производства жидких транспортных топлив из альтернативного сырья. Стабилизация активной фазы является одной из ключевых задач при разработке катализаторов гидрирования CO в жидкое моторное топливо. Эта задача может быть решена путем выбора оптимального носителя, а также метода синтеза. Настоящая работа посвящена разработке новых полимерных моно- и биметаллических Ru-содержащих нанокатализаторов для жидкофазного синтеза Фишера-Тропша. Показано, что использование 1% Ru-СПС и 10% Co — 1% Ru-СПС позволяет получать высокий выход бензиновых углеводородов диапазона C₅–C₉ (более 70%), обеспечивая высокую конверсию CO (до 23%). Выбранные системы на основе полимеров показали высокую стабильность в процессе синтеза Фишера-Тропша.

Abstract. The search for new stable and active catalysts of Fischer-Tropsch synthesis is one of the key directions for production of liquid fuels from alternative raw materials. Stabilization of the active phase is the main task in the development of catalysts for hydrogenation of CO into liquid fuels. This problem can be solved by choosing the optimal support, as well as the synthesis method. This work is devoted to the development of new polymer mono- and bimetallic Ru-containing catalysts for liquid phase Fischer-Tropsch synthesis. It is shown that the use of 1% Ru-HPS and 10% Co — 1% Ru-HPS allows to obtain a high yield of gasoline hydrocarbons (more than 70%), providing a high conversion of CO (up to 23%). The selected polymer-based systems showed high stability in the Fischer-Tropsch synthesis process.

Ключевые слова: рутений, сверхсшитый полистирол, синтез Фишера-Тропша, углеводороды бензинового ряда.

Keywords: ruthenium, hypercrosslinked polystyrene, Fischer-Tropsch synthesis, gasoline range hydrocarbons.

Введение

Растущая потребность в жидком топливе и растущие цены на нефть, а также экологические проблемы, вызывают интерес к переходу от ископаемого к возобновляемому и отходному сырью в качестве источников энергии. Газификация сельскохозяйственных и бытовых отходов или биомассы приводит к образованию газообразной смеси, состоящей в основном из монооксида углерода и водорода [1]. Эти газы являются наиболее перспективным сырьем для производства топлив и ценных химических веществ. Комплекс реакций между монооксидом углерода и водородом, приводящих к образованию различных соединений (алканов, парафинов, олефинов, оксигенатов), в совокупности называют синтезом Фишера-Тропша (СФТ) [2]. В настоящее время СФТ является наиболее интенсивно изучаемым процессом. Интерес исследователей связан с разработкой новых технологий, катализаторов и оборудования для гидрирования монооксида углерода с целью получения высоких выходов целевых продуктов. Молекулярно-массовое распределение продуктов СФТ зависит от типа реактора, условий процесса и природы и структуры катализатора [3].

В настоящее время интерес исследователей сосредоточен на разработке новых высокоэффективных и стабильных катализаторов для СФТ. Переходные металлы и их соединения, такие как нитриды, оксиды и карбиды, являются наиболее активными для процесса гидрирования СО. Наибольшая каталитическая активность наблюдается при использовании Ru, Ni, Co и Fe [4]. Основной проблемой катализаторов СФТ является стабилизация активного металла с целью предотвращения агрегации и вымывания активной фазы [5]. Известно, что для катализаторов СФТ слабое взаимодействие между носителем и активным металлом является одним из ключевых факторов [6]. В настоящее время наноразмерные мезопористые материалы, такие как бета-цеолиты [7], активированный уголь [5], α -глинозем [8], оксид титана [9] и графеновые наночастицы [10] широко используются в СФТ. Кроме того, существует ряд работ, посвященных применению глинозема, покрытого цеолитовой пленкой ZSM [11] и металлоорганических каркасов (MOF) [12] в качестве носителей для катализаторов Co и Fe. Помимо выбора носителя, большой интерес представляют также методы нанесения металлов. Такие новые подходы, как аэрозольный синтез [13], ультразвуковое осаждение [14] и пиролитическое нанесение [5] применяются для стабилизации активной фазы.

Как видно, материалы, используемые в качестве носителей катализаторов для СФТ, имеют в основном неорганическую природу и, таким образом, могут сильно влиять на электронную структуру и состав активного металла. Кроме того, неорганические материалы имеют ограниченную площадь поверхности и нерегулярную структуру пор, что может иметь решающее значение для распределения продуктов. Жесткие полимерные каркасы, характеризующиеся высокой площадью поверхности и хорошо структурированными порами, могут быть перспективной альтернативой носителям катализаторов СФТ. Однако практически отсутствуют сведения о применении катализаторов на основе полимеров при гидрировании СО. Таким образом, данная работа направлена на изучение каталитического поведения полимерных катализаторов в СФТ для производства бензиновых углеводородов.

Материал и методы исследования

В данной работе предложено использование сверхсшитого полистирола (СПС) в качестве носителя катализаторов СФТ. Этот материал благодаря своей высокой площади поверхности и жесткой структуре позволяет стабилизировать металл с высокой дисперсностью и, кроме того, предотвратить агрегацию и вымывание активной фазы [15]. Кроме того, такие катализаторы устойчивы к дезактивации [16]. Однако СПС считается микропористым материалом. Гидротермальный синтез катализаторов, применяемых в данной работе, позволяет изменять пористость СПС, образуя поры со средним диаметром 20-50 нм, как было показано в [17].

Катализаторы были синтезированы в реакторе высокого давления Parr-4307 из нержавеющей стали (Parr Instrument, США) по методике, представленной в [17]. Для синтеза катализаторов использовались следующие материалы: нитрат кобальта (II) (х.ч., Реахим, Россия), нитрат никеля (х.ч., Реахим, Россия), гидроксохлорид рутения (х.ч. АураТ, Россия), бикарбонат натрия (х.ч. Реахим, Россия), сверхсшитый полистирол (MN-270, Purolight Inc., Великобритания), дистиллированная вода.

Полученные катализаторы тестировались в жидкофазном синтезе Фишера-Тропша в стальном реакторе PARR-4307 (Parr Instrument, США) с использованием *n*-додекана в качестве растворителя. В качестве синтез-газа использовали смесь CO и H₂ в объемном соотношении 1:4. Высокое содержание водорода в газовой смеси обусловлено необходимостью дополнительного гидрирования олефинов и кислородсодержащих соединений. Температура процесса составляла 200 °С, общее давление в реакторе – 2,0 МПа, масса катализатора — 0,1 г, объем растворителя — 30 мл.

Анализ жидкой фазы проводился методом газовой хромато-масс-спектрометрии с использованием газового хроматографа GC-2010 и масс-спектрометра GCMS-QP2010S (SHIMADZU, Япония). Анализ газовой фазы проводили хроматографическим методом с использованием газового хроматографа Crystallux 4000M, оснащенного пламенно-ионизационным детектором и катарометром.

Результаты и обсуждение

Анализ конверсии CO в ходе СФТ в присутствии 1%Ru-СПС показал, что использование катализаторов на полимерной основе обеспечивает значительно более высокую скорость реакции ($6,7 \text{ ммоль} \cdot \text{г}_{\text{кат}}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$) по сравнению с литературными данными для жидкофазного процесса [18]. Установлено, что степень конверсии CO для монометаллического катализатора близка к степени конверсии для классических газофазных процессов СФТ (22,3%) [18]. Такая высокая активность катализаторов может быть объяснена высокой удельной поверхностью и более высокой доступностью активных участков катализатора.

Анализ продуктов реакции (Рисунок 1) показал, что использование 1%Ru-СПС снижает образование газообразных углеводородов (до 9%) по сравнению с традиционно используемыми катализаторами [19]. При использовании рутениевого катализатора были получены в основном углеводороды C₆–C₉ (более 70%). В этом случае октан являлся основным продуктом реакции. Образование жидких углеводородов является следствием высокой адсорбционной способности носителя и наличия крупных мезопор (Таблица 1). Необходимо отметить что Ru-содержащий катализатор обеспечивает образование насыщенных углеводородов.

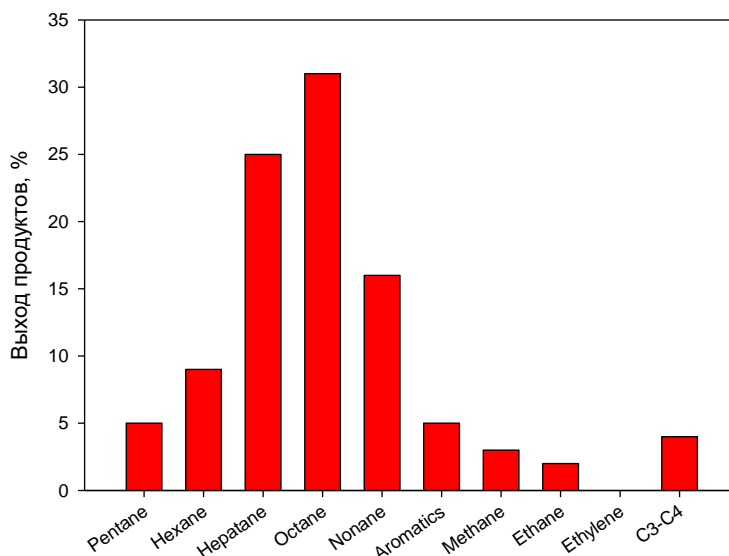


Рисунок 1. Выход продуктов СФТ в присутствии 1%Ru-СПС.

Для оценки влияния добавок Co и Ni на рутениевый катализатор СФТ проводили с использованием биметаллических 10%Co–1%Ru-СПС и 10%Ni–1%Ru-СПС катализаторов. Добавление металлов подгруппы железа к рутениевому катализатору повышает степень конверсии CO (до 23,1% для 10%Co–1%Ru-СПС) и среднюю скорость процесса (до $7,2 \text{ ммоль} \cdot \text{г}_{\text{кат}}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$). Кроме того, биметаллические катализаторы показали снижение выхода метана, а также общего выхода газообразных углеводородов (Рисунок 2). Самый низкий выход метана (2%) и самый высокий выход углеводородов C₆–C₇ (57%) наблюдались при использовании катализатора 10%Co–1%Ru-СПС.

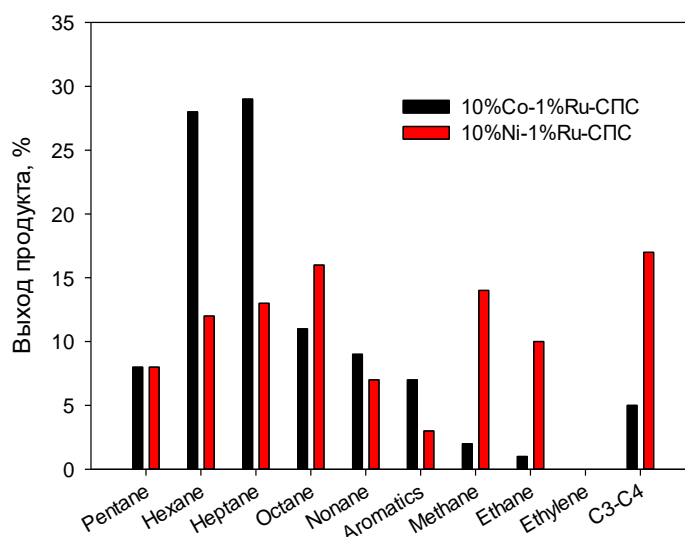


Рисунок 2. Выход продуктов СФТ в присутствии биметаллических полимерных катализаторов.

По результатам испытаний в качестве оптимальных катализаторов СФТ были выбраны 1%Ru-СПС и 10%Co–1%Ru-СПС, обеспечивающие более высокий выход жидких углеводородов бензинового ряда (более 70%). Стабильность работы выбранных катализаторов показана на рисунке 3.

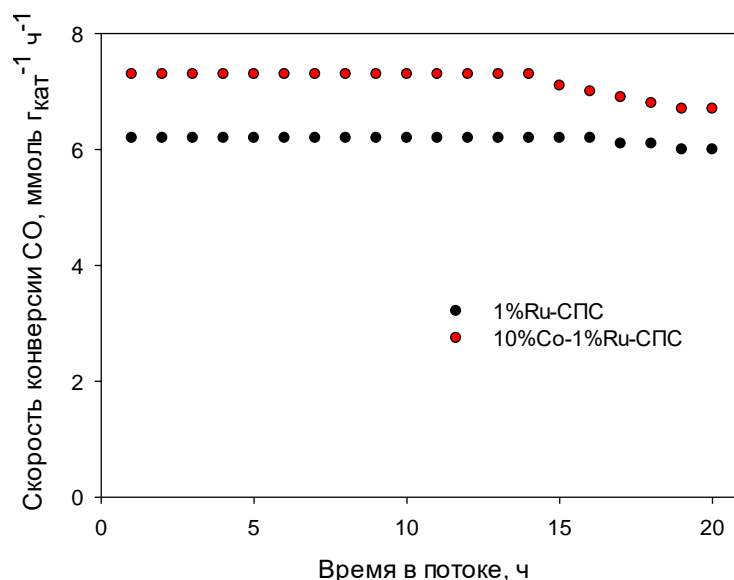


Рисунок 3. Стабильность работы катализаторов в жидкофазном процессе СФТ.

Как видно из рисунка 3, рутений содержащий катализатор показал более высокую стабильность по сравнению с биметаллическим 10%Co–1%Ru-СПС. Однако снижение скорости реакции наблюдалось только через 15 ч в потоке. Кроме того, потеря активности оказалась незначительной для обоих катализаторов (3,2% для 1%Ru–СПС и 8,2% для 10%Co–1%Ru-СПС) после 20 ч процесса.

Заключение

В данной работе исследована активность моно- и биметаллических рутенийсодержащих катализаторов, синтезированных методом гидротермального осаждения в жидкофазном СФТ. Установлено, что 1%Ru-СПС и 10%Co–1%Ru-СПС являются эффективными катализаторами, позволяющими получать высокий выход (до 73%) углеводородов бензинового ряда C₅–C₉. Ru-катализатор показал более высокую селективность в отношении образования углеводородов C₈–C₉ (до 50%), в то время как для Co-Ru катализатора наблюдался сдвиг селективности в сторону углеводородов C₆–C₇ (до 57%). Выбранные системы на основе полимеров показали высокую стабильность в процессе СФТ. Снижение активности было обнаружено на 3–8% через 20 ч работы в потоке. Данное исследование может стать базой для дальнейших работ по использованию полимеров в процессах гидрирования СО. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию состава катализатора, выбор условий синтеза катализатора, а также оптимизацию условий реакции СФТ.

Исследования проводились при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 17-08-00609, 18-29-06004, 17-08-00659).

Список литературы:

1. van Steen E., Claeys M. Fischer-Tropsch Catalysts for the Biomass-to-Liquid (BTL)-Process // Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology. 2008. V. 31. №5. P. 655-666. <https://doi.org/10.1002/ceat.200800067>

2. Zamani Y., Zamaniyan A., Bahadoran F., Shojaei M. Effect of Calcium Promoters on Nanostructured Iron Catalyst for Fischer-Tropsch Synthesis // *Journal of Petroleum Science and Technology*. 2015. V. 5. №1. P. 21-27. <http://jpst.ripi.ir>
3. Li B., Jens K. J. Low-temperature and low-pressure methanol synthesis in the liquid phase catalyzed by copper alkoxide systems // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013. V. 53. №5. P. 1735-1740. <https://doi.org/10.1021/ie401966w>
4. Perego C., Bortolo R., Zennaro R. Gas to liquids technologies for natural gas reserves valorization: The Eni experience // *Catalysis Today*. 2009. V. 142. №1-2. P. 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2009.01.006>
5. Zhao X., Lv S., Wang L., Li L., Wang G., Zhang Y., Li J. Comparison of preparation methods of iron-based catalysts for enhancing Fischer-Tropsch synthesis performance // *Molecular Catalysis*. 2018. V. 449. P. 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2018.02.022>
6. Oh J. H., Bae J. W., Park S. J., Khanna P. K., Jun K. W. Slurry-phase Fischer-Tropsch synthesis using Co/ γ -Al₂O₃, Co/SiO₂ and Co/TiO₂: effect of support on catalyst aggregation // *Catalysis letters*. 2009. V. 130. №3-4. P. 403-409. <https://doi.org/10.1007/s10562-009-0021-0>
7. Li H., Hou B., Wang J., Qin C., Zhong M., Huang X., ... et al. Direct conversion of syngas to isoparaffins over hierarchical beta zeolite supported cobalt catalyst for Fischer-Tropsch synthesis // *Molecular Catalysis*. 2018. V. 459. P. 106-112. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2018.08.002>
8. Rytter E., Borg Ø., Enger B. C., Holmen A. α -alumina as catalyst support in Co Fischer-Tropsch synthesis and the effect of added water; encompassing transient effects // *Journal of Catalysis*. 2019. V. 373. P. 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2019.03.013>
9. Kliewer C. E., Soled S. L., Kiss G. Morphological transformations during Fischer-Tropsch synthesis on a titania-supported cobalt catalyst // *Catalysis Today*. 2019. V. 323. P. 233-256. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.05.021>
10. Taghavi S., Tavasoli A., Asghari A., Signoreto M. Loading and promoter effects on the performance of nitrogen functionalized graphene nanosheets supported cobalt Fischer-Tropsch synthesis catalysts // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. V. 44. №21. P. 10604-10615. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.015>
11. Zhu C., Bollas G. M. Gasoline selective Fischer-Tropsch synthesis in structured bifunctional catalysts // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2018. V. 235. P. 92-102. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.04.063>
12. Isaeva V. I., Eliseev O. L., Kazantsev R. V., Chernyshev V. V., Tarasov A. L., Davydov P. E., ... et al. Effect of the support morphology on the performance of Co nanoparticles deposited on metal-organic framework MIL-53 (Al) in Fischer-Tropsch synthesis // *Polyhedron*. 2019. V. 157. P. 389-395. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2018.10.001>
13. Arias A. M., Weber A. P. Aerosol synthesis of porous SiO₂-cobalt-catalyst with tailored pores and tunable metal particle size for Fischer-Tropsch synthesis (FTS) // *Journal of Aerosol Science*. 2019. V. 131. P. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2019.02.003>
14. Abbas M., Xue Y., Zhang J., Chen J. Ultrasound induced morphology-controlled synthesis of Au nanoparticles decorated on Fe₂O₃/ZrO₂ catalyst and their catalytic performance in Fischer-Tropsch synthesis // *Fuel processing technology*. 2019. V. 187. P. 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.01.009>
15. Stepacheva A. A., Matveeva V. G., Sulman E. M., Sapunov V. N. Fatty Acid Hydrotreatment Using Hypercrosslinked Polystyrene-supported Pd Catalysts to Produce Biofuels // *Chemical Engineering Transactions*. 2016. V. 52. P. 625-630. <https://doi.org/10.3303/CET1652105>

16. Sidorov A. I., Tkachenko O. P., Sulman E., Doluda V., Stepacheva A. X-Ray Absorption Spectroscopy Study of ZnO-CuO-HPS Catalyst // *Chemical Engineering Transactions*. 2017. V. 61. P. 607-612. <https://doi.org/10.3303/CET1761099>
17. Stepacheva A. A., Markova M. E., Bykov A. V., Sidorov A. I., Sulman M. G., Matveeva V. G., Sulman E. M. Ni catalyst synthesized by hydrothermal deposition on the polymeric matrix in the supercritical deoxygenation of fatty acids // *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. 2018. V. 125. №1. P. 213-226. <https://doi.org/10.1007/s11144-018-1424-y>
18. Davis B. H. Overview of reactors for liquid phase Fischer-Tropsch synthesis // *Catalysis Today*. 2002. V. 71. №3-4. P. 249-300. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(01\)00455-2](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(01)00455-2)
19. Dutta P., Manivannan A., Seehra M. S., Adekkanattu P. M., Guin J. A. Determination of the electronic state and concentration of nickel in NiSAPO catalysts by magnetic measurements // *Catalysis letters*. 2004. V. 94. №3-4. P. 181-185. <https://doi.org/10.1023/B:CATL.0000020543.63517.c4>

References:

1. van Steen, E., & Claeys, M. (2008). Fischer-Tropsch Catalysts for the Biomass-to-Liquid (BTL)-Process. *Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology*, 31(5), 655-666. <https://doi.org/10.1002/ceat.200800067>
2. Zamani, Y., Zamaniyan, A., Bahadoran, F., & Shojaei, M. (2015). Effect of Calcium Promoters on Nanostructured Iron Catalyst for Fischer-Tropsch Synthesis. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 5(1), 21-27. <http://jpest.ripi.ir>
3. Li, B., & Jens, K. J. (2013). Low-temperature and low-pressure methanol synthesis in the liquid phase catalyzed by copper alkoxide systems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(5), 1735-1740. <https://doi.org/10.1021/ie401966w>
4. Perego, C., Bortolo, R., & Zennaro, R. (2009). Gas to liquids technologies for natural gas reserves valorization: The Eni experience. *Catalysis Today*, 142(1-2), 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2009.01.006>
5. Zhao, X., Lv, S., Wang, L., Li, L., Wang, G., Zhang, Y., & Li, J. (2018). Comparison of preparation methods of iron-based catalysts for enhancing Fischer-Tropsch synthesis performance. *Molecular Catalysis*, 449, 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2018.02.022>
6. Oh, J. H., Bae, J. W., Park, S. J., Khanna, P. K., & Jun, K. W. (2009). Slurry-phase Fischer-Tropsch synthesis using Co/ γ -Al₂O₃, Co/SiO₂ and Co/TiO₂: effect of support on catalyst aggregation. *Catalysis letters*, 130(3-4), 403-409. <https://doi.org/10.1007/s10562-009-0021-0>
7. Li, H., Hou, B., Wang, J., Qin, C., Zhong, M., Huang, X., ... & Li, D. (2018). Direct conversion of syngas to isoparaffins over hierarchical beta zeolite supported cobalt catalyst for Fischer-Tropsch synthesis. *Molecular Catalysis*, 459, 106-112. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2018.08.002>
8. Rytter, E., Borg, Ø., Enger, B. C., & Holmen, A. (2019). α -alumina as catalyst support in Co Fischer-Tropsch synthesis and the effect of added water; encompassing transient effects. *Journal of Catalysis*, 373, 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2019.03.013>
9. Kliewer, C. E., Soled, S. L., & Kiss, G. (2019). Morphological transformations during Fischer-Tropsch synthesis on a titania-supported cobalt catalyst. *Catalysis Today*, 323, 233-256. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.05.021>
10. Taghavi, S., Tavasoli, A., Asghari, A., & Signoretto, M. (2019). Loading and promoter effects on the performance of nitrogen functionalized graphene nanosheets supported cobalt Fischer-Tropsch synthesis catalysts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(21), 10604-10615. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.015>

11. Zhu, C., & Bollas, G. M. (2018). Gasoline selective Fischer-Tropsch synthesis in structured bifunctional catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 235, 92-102. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.04.063>
12. Isaeva, V. I., Eliseev, O. L., Kazantsev, R. V., Chernyshev, V. V., Tarasov, A. L., Davydov, P. E., ... & Kustov, L. M. (2019). Effect of the support morphology on the performance of Co nanoparticles deposited on metal-organic framework MIL-53 (Al) in Fischer-Tropsch synthesis. *Polyhedron*, 157, 389-395. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2018.10.001>
13. Arias, A. M., & Weber, A. P. (2019). Aerosol synthesis of porous SiO₂-cobalt-catalyst with tailored pores and tunable metal particle size for Fischer-Tropsch synthesis (FTS). *Journal of Aerosol Science*, 131, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2019.02.003>
14. Abbas, M., Xue, Y., Zhang, J., & Chen, J. (2019). Ultrasound induced morphology-controlled synthesis of Au nanoparticles decorated on Fe₂O₃/ZrO₂ catalyst and their catalytic performance in Fischer-Tropsch synthesis. *Fuel processing technology*, 187, 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.01.009>
15. Stepacheva, A. A., Matveeva, V. G., Sulman, E. M., & Sapunov, V. N. (2016). Fatty Acid Hydrotreatment Using Hypercrosslinked Polystyrene-supported Pd Catalysts to Produce Biofuels. *Chemical Engineering Transactions*, 52, 625-630. <https://doi.org/10.3303/CET1652105>
16. Sidorov, A. I., Tkachenko, O. P., Sulman, E., Doluda, V., & Stepacheva, A. (2017). X-Ray Absorption Spectroscopy Study of ZnO-CuO-HPS Catalyst. *Chemical Engineering Transactions*, 61, 607-612. <https://doi.org/10.3303/CET1761099>
17. Stepacheva, A. A., Markova, M. E., Bykov, A. V., Sidorov, A. I., Sulman, M. G., Matveeva, V. G., & Sulman, E. M. (2018). Ni catalyst synthesized by hydrothermal deposition on the polymeric matrix in the supercritical deoxygenation of fatty acids. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 125(1), 213-226. <https://doi.org/10.1007/s11144-018-1424-y>
18. Davis, B. H. (2002). Overview of reactors for liquid phase Fischer-Tropsch synthesis. *Catalysis Today*, 71(3-4), 249-300. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(01\)00455-2](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(01)00455-2)
19. Dutta, P., Manivannan, A., Seehra, M. S., Adekkanattu, P. M., & Guin, J. A. (2004). Determination of the electronic state and concentration of nickel in NiSAPO catalysts by magnetic measurements. *Catalysis letters*, 94(3-4), 181-185. <https://doi.org/10.1023/B:CATL.0000020543.63517.c4>

Работа поступила
в редакцию 11.10.2019 г.

Принята к публикации
16.10.2019 г.

Ссылка для цитирования:

Маркова М. Е., Степачева А. А., Гавриленко А. В., Петухова И. Д. Ru-содержащие катализаторы для жидкофазного синтеза Фишера-Тропша // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. №11. С. 37-44. <https://doi.org/10.33619/10.33619/2414-2948/48/04>

Cite as (APA):

Markova, M., Stepacheva, A., Gavrilenko, A., & Petukhova, I. (2019). Ru-containing Catalysts for Liquid-phase Fischer-Tropsch Synthesis. *Bulletin of Science and Practice*, 5(11), 37-44. <https://doi.org/10.33619/10.33619/2414-2948/48/04> (in Russian).