

УДК 544.478.32 + 544.478.02
AGRIS P33

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/48/01>

ПОЛИМЕРНЫЙ МАГНИТООТДЕЛЯЕМЫЙ КАТАЛИЗАТОР ДЛЯ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДЕОКСИГЕНИРОВАНИЯ ЖИРНЫХ КИСЛОТ

- ©*Степачева А. А.*, SPIN-код: 6628-9111, ORCID: 0000-0001-9366-5201, канд. хим. наук, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия, a.a.stepacheva@mail.ru
- ©*Семенова А. М.*, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия, science@science.tver.ru
- ©*Яблокова Н. С.*, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия, natasha.yablokova@yandex.ru
- ©*Куприянова Е. Е.*, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия, science@science.tver.ru
- ©*Рудь Д. В.*, Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия, science@science.tver.ru

POLYMER MAGNETICALLY SEPARABLE CATALYST FOR SUPERCRITICAL DEOXYGENATION OF FATTY ACIDS

- ©*Stepacheva A.*, SPIN-code: 6628-9111, ORCID: 0000-0001-9366-5201, Ph.D., Tver State Technical University, Tver, Russia, a.a.stepacheva@mail.ru
- ©*Semenova A.*, Tver State Technical University, Tver, Russia, science@science.tver.ru
- ©*Yablokova N.*, Tver State Technical University, Tver, Russia, natasha.yablokova@yandex.ru
- ©*Kupriyanova E.*, Tver State Technical University, Tver, Russia, science@science.tver.ru
- ©*Rud D.*, Tver State Technical University, Tver, Russia, science@science.tver.ru

Аннотация. В данной работе изучена возможность использования магнитоотделяемого рутений содержащего катализатора на основе полимерной матрицы сверхсшитого полистирола в сверхкритическом деоксигенировании стеариновой кислоты для получения биодизельного топлива второго поколения. Катализатор был синтезирован путем последовательного нанесения оксидов железа и рутения на полимерный носитель. Полученная каталитически активная система Ru-Fe₃O₄-СПС характеризуется высокими значениями удельной поверхности (364 м²/г) и намагниченности (4,5 Гс·см³/г). Данный катализатор позволяет получать высокий (до 86%) выход углеводородов C₁₇₊ и проявляет высокую активность в процессе деоксигенирования в сверхкритическом н-гексане. Было установлено, что выбранная каталитическая система сохраняет свою каталитическую активность в течение как минимум 10 последовательных циклов.

Abstract. In this paper, the possibility of using a magnetically separated ruthenium-containing catalyst based on a polymer matrix of hypercrosslinked polystyrene in the supercritical deoxygenation of stearic acid to produce a second-generation biodiesel fuel is studied. The catalyst was synthesized by a successive deposition of iron and ruthenium oxides to the polymeric support. The resulting catalytically active Ru-Fe₃O₄-HPS system is characterized by high specific surface area (364 m²/g) and magnetization (4.5 emu/g). This catalyst allows obtaining a high (up to 86%) yield of hydrocarbons C₁₇₊ and exhibits high activity in the process of deoxygenation in

supercritical n-hexane. It was found that the selected catalytic system retains its catalytic activity for at least 10 consecutive cycles.

Ключевые слова: жирные кислоты, магнитоотделяемый катализатор, сверхсшитый полистирол, деоксигенирование, сверхкритические условия.

Keywords: fatty acids, magnetically separable catalyst, hypercrosslinked polystyrene, deoxygenation, supercritical conditions.

Введение

В последние десятилетия большое внимание уделяется синтезу второго поколения биодизельного топлива путем деоксигенирования жирных кислот и их производных [1]. В результате этого процесса получают жидкое дизельное топливо, характеризующееся низкой кислотностью и вязкостью, а также высоким цетановым числом (до 99) [2]. Деоксигенирование позволяет получать углеводороды дизельного ряда путем удаления кислорода из молекул жирных кислот в присутствии сульфидов, нитридов, фосфидов и оксидов переходных металлов, либо катализаторов на основе благородных металлов [2–5].

Однако существующие проблемы деоксигенирования, такие как стабильность и селективность катализаторов и высокое потребление водорода, а также достаточно жесткие условия, требуют разработки новых подходов. Одним из таких перспективных путей является использование сверхкритических растворителей для конверсии жирных кислот в углеводороды. Использование сверхкритических жидкостей в качестве среды для процесса деоксигенирования может значительно снизить температуру процесса, а также время реакции. Кроме того, некоторые соединения, такие как легкие углеводороды, спирты и вода в сверхкритическом состоянии могут служить донором атомов водорода [6]. Последнее свойство сверхкритических жидкостей позволяет решить проблему потребления водорода. В настоящее время чаще всего используются сверхкритическая вода, углекислый газ, пропан и гексан [7–9]. Гексан в сверхкритическом состоянии считается наиболее оптимальной средой для процесса деоксигенирования, поскольку он имеет относительно низкую критическую точку ($T_c = 234,5\text{ }^\circ\text{C}$, $P_c = 3,02\text{ МПа}$) и хорошо смешивается с жирами при комнатных условиях [9]. Недавно мы также сообщили об успешном применении сверхкритического гексана при деоксигенировании стеариновой кислоты [10–12]. Учитывая реакции крекинга, которые могут протекать при сверхкритическом деоксигенировании, поиск катализаторов, ускоряющих процессы декарбокислирования и гидрирования, является важной задачей.

В настоящее время большое внимание уделяется катализаторам с магнитными свойствами. Эти свойства минимизируют потери катализатора и позволяют полностью извлекать катализатор из реакционной смеси [13]. Кроме того, катализаторы, содержащие магнитные наночастицы (МНЧ), характеризуются высокой удельной поверхностью и повышенной каталитической активностью за счет присутствия Fe-, Ni- или Co-содержащих частиц [14]. Магнитоотделяемые катализаторы успешно применяются при конверсии биомассы в биотопливо и химические вещества [15–17]. Основными проблемами применения МНЧ в каталитических реакциях являются их стабилизация и предотвращение агрегации, а также низкая устойчивость к окислению. Для этих целей используются различные подходы, такие как покрытие МНЧ кремнеземом или углеродом [18–19]. Кроме того, для повышения каталитической активности материалов на магнитной основе широко применяется включение благородных металлов [17, 19]. В данной работе исследовалась возможность использования магнитоотделяемого катализатора на основе сверхсшитого полистирола в каталитическом деоксигенировании стеариновой кислоты в среде

сверхкритического *n*-гексана с целью получения дизельных углеводородов из возобновляемого сырья.

Материалы и методы исследования

Синтез катализатора

Fe₃O₄-СПС образец был приготовлен в соответствии со следующей процедурой: смесь, состоящую из 1,45 г FeCl₃ и 0,5 г CH₃COONa×3H₂O, растворенного в 10 мл этанола и 2,5 г СПС, промытого ацетоном и высушенного, перемешивали 12 часов на воздухе, а затем сушили при температуре 60 °С в течение 2 часов. Полученный порошок смачивали 25 каплями этиленгликоля и нагревали в кварцевой трубке в атмосфере аргона при температуре 200 °С в течение 5 ч.

0,3856 г RuОНCl₃ растворяли в 6 мл комплексного растворителя, состоящего из воды, метанола и тетрагидрофурана (1:1:4), и смешивали в течение 15 минут с Fe₃O₄-СПС, приготовленным на предыдущей стадии. Полученный образец сушили при 70 °С и диспергировали в 30 мл дистиллированной воды, нагретой до 70 °С при pH 10,0, добавляя по каплям 0,2 М раствор NaOH. Полученный образец промывали дистиллированной водой для нейтрализации и сушили при 70 °С в течение 12 часов на воздухе. Восстановление катализатора проводили в токе водородом при 300 °С в течение 2 ч.

Деоксигенирование стеариновой кислоты

Стеариновая кислота была выбрана в качестве модельного соединения для экспериментов деоксигенирования. Эксперимент проводили в реакторе Parr Series 5000 Multiple Reactor System в среде сверхкритического *n*-гексана при следующих условиях: концентрация стеариновой кислоты в *n*-гексане — 0,2 моль / л, масса катализатора — 0,05 г, температура — 250 °С, давление азота — 3,0 МПа, общее давление — 6,8 МПа, скорость перемешивания — 1300 об/мин.

Результаты и обсуждение

Тестирование синтезированного магнитоотделяемого катализатора в деоксигенировании стеариновой кислоты в среде сверхкритического *n*-гексана показало, что катализатор позволяет достичь до 99% конверсии стеариновой кислоты в течение 70 минут (Рисунок 1) за счет высокой площади поверхности и высокой концентрации Ru и Fe (Таблица 1). Образец обеспечивает высокую начальную скорость конверсии в течение первых 20 минут. Затем скорость реакции значительно снижается, что может быть связано с насыщением активных центров катализатора и закупоркой пор адсорбированным субстратом и/или продуктами.

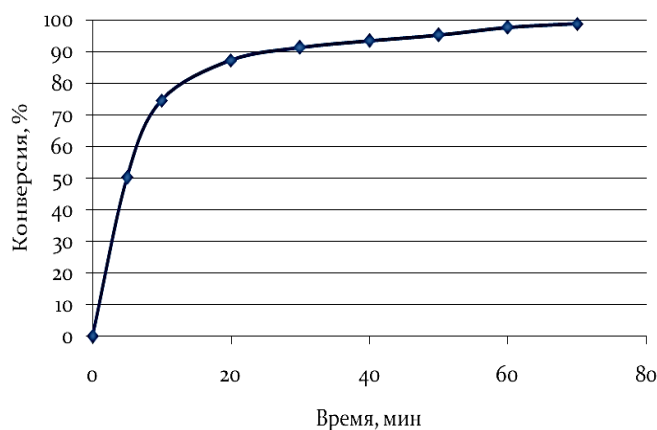


Рисунок 1. Конверсия стеариновой кислоты в присутствии магнитоотделяемого катализатора.

Таблица 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА МАГНИТООТДЕЛЯЕМОГО КАТАЛИЗАТОРА

Образец	Площадь поверхности, m^2/g	Содержание металла, масс.%		Соединение металла	
		Fe	Ru	Fe	Ru
СПС	1070	—	—	—	—
Fe ₃ O ₄ -СПС	440	19,0	—	Fe ₃ O ₄	—
Ru-Fe ₃ O ₄ -СПС	360	18,8	2,6	Fe ₃ O ₄	RuO ₂

Анализ реакционной смеси показал наличие пальмитиновой кислоты, н-октадекана, н- и и-пентадекана и н- и и-гептадекана среди продуктов реакции (Рисунок 2). Интересно, что образование пальмитиновой кислоты наблюдается в течение первых 20 минут процесса, возможно, за счет крекинга стеариновой кислоты в сверхкритических условиях, а затем снижение ее концентрации протекает с образованием пентадекана (Рисунок 3). Протекание реакций крекинга может быть связано с присутствием оксида железа на поверхности катализатора. Для сравнения, Ru-содержащий катализатор на основе СПС не показывает образования пальмитиновой кислоты при деоксигенировании при тех же условиях реакции. Однако катализатор без магнитных частиц позволяет достичь только 88% конверсии в течение 70 минут. Кроме того, при использовании катализатора Ru-СПС не наблюдается изомеров C₁₅–C₁₇, что указывает на то, что введение Fe₃O₄ обеспечивает изомеризацию продукта.

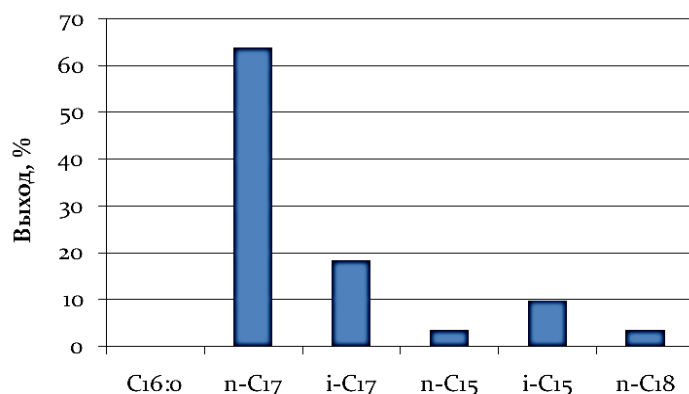


Рисунок 2. Выход продуктов деоксигенирования

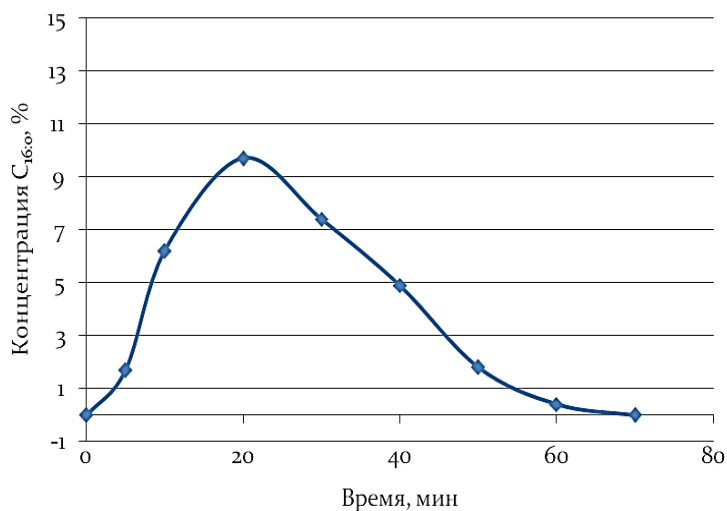


Рисунок 3. Изменение концентрации пальмитиновой кислоты во времени.

Стабильность работы катализатора Ru-Fe₃O₄-СПС была протестирована при многократном использовании (Таблица 2). Видно, что активность и селективность катализатора остается постоянной в течение, по меньшей мере, 10 последовательных циклов. Кроме того, суммарная потеря катализатора, по оценкам, составляет менее 0,05 масс.%, указывая на полное извлечение катализатора из реакционной смеси.

Таблица 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОКРАТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
МАГНИТООТДЕЛЯЕМОГО КАТАЛИЗАТОРА

Цикл	Конверсия стеариновой кислоты, %	Селективность C ₁₇₊ , %	Потеря массы катализатора
1	98,8	86,7	0,003
2	98,8	86,7	0,002
3	98,8	86,7	0,002
4	98,8	86,7	0,002
5	98,8	86,7	0,003
...
10	98,7	86,5	0,01

Заключение

В данной работе проводилось исследование конверсии стеариновой кислоты в среде сверхкритического н-гексана в присутствии магнитоотделяемого катализатора на основе сверхсшитого полистирола. Используемый катализатор позволяет достичь 99% конверсии субстрата за 70 минут реакции, тогда как катализатор, не содержащий магнитные наночастицы, преобразует только 85% субстрата за это же время. Суммарная селективность по C₁₇₊ углеводородам в присутствии магнитоотделяемого катализатора составила около 87%. Синтезированный катализатор показал высокую стабильность работы, не снижая своей активности и селективности в течение минимум 10 последовательных циклов.

Исследования проводились при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 19-79-10061). Физико-химическое исследование катализатора проводилось при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 19-08-00318, 18-29-06004, 19-58-26003, 20-38-70052).

Список литературы:

1. Peralta-Ruiz Y., Obregon L. G., Gonzalez-Delgado A. D. Design of biodiesel and bioethanol production process from microalgae biomass using exergy analysis methodology // Chemical Engineering Transactions. 2018. V. 70. P. 1045-1050. <https://doi.org/10.3303/CET1870175>
2. de Sousa F. P., Cardoso C. C., Pasa V. M. D. Producing hydrocarbons for green diesel and jet fuel formulation from palm kernel fat over Pd/C // Fuel processing technology. 2016. V. 143. P. 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.10.024>
3. Zhang Z. et al. Hydroconversion of Waste Cooking Oil into Bio-Jet Fuel over a Hierarchical NiMo/USY@ Al-SBA-15 Zeolite // Chemical Engineering & Technology. 2018. V. 41. №3. P. 590-597. <https://doi.org/10.1002/ceat.201600601>
4. Hachemi I., Jenišťová K., Mäki-Arvela P., Kumar N., Eränen K., Hemming J., Murzin D. Y. Comparative study of sulfur-free nickel and palladium catalysts in hydrodeoxygenation of different

fatty acid feedstocks for production of biofuels // *Catalysis Science & Technology*. 2016. V. 6. №5. P. 1476-1487. <https://doi.org/10.1039/C5CY01294E>

5. Galadima A., Muraza O. Catalytic upgrading of vegetable oils into jet fuels range hydrocarbons using heterogeneous catalysts: A review // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2015. V. 29. P. 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.030>

6. Hollak S. A., Ariëns M. A., de Jong K. P., van Es D. S. Hydrothermal deoxygenation of triglycerides over Pd/C aided by in situ hydrogen production from glycerol reforming // *ChemSusChem*. 2014. V. 7. №4. P. 1057-1062. <https://doi.org/10.1002/cssc.201301145>

7. Kim S. K., Lee H. S., Hong M. H., Lim J. S., Kim J. Low-temperature, Selective Catalytic Deoxygenation of Vegetable Oil in Supercritical Fluid Media // *ChemSusChem*. 2014. V. 7. №2. P. 492-500. <https://doi.org/10.1002/cssc.201300974>

8. Hossain M. Z., Jhavar A. K., Chowdhury M. B., Xu W. Z., Wu W., Hiscott D. V., Charpentier P. A. Using subcritical water for decarboxylation of oleic acid into fuel-range hydrocarbons // *Energy & Fuels*. 2017. V. 31. №4. P. 4013-4023. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b03418>

9. Fang X., Shi Y., Wu K., Liang J., Wu Y., Yang M. Upgrading of palmitic acid over MOF catalysts in supercritical fluid of n-hexane // *RSC Advances*. 2017. V. 7. №64. P. 40581-40590. <https://doi.org/10.1039/C7RA07239B>

10. 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>

11. Stepacheva A. A., Sidorov A. I., Matveeva V. G., Sulman M. G., Sulman E. M. Fatty Acid Deoxygenation in Supercritical Hexane over Catalysts Synthesized Hydrothermally for Biodiesel Production // *Chemical Engineering & Technology*. 2019. V. 42. №4. P. 780-787. <https://doi.org/10.1002/ceat.201800595>

12. Степачева А. А., Семенова А. М., Яблокова Н. С., Куприянова Е. Е. Сверхкритическое деоксигенирование стеариновой кислоты в присутствии кобальтсодержащего катализатора // *Бюллетень науки и практики*. 2018. Т. 4. №12. С. 62-68.

13. Guo P., Huang F., Zheng M., Li W., Huang Q. Magnetic solid base catalysts for the production of biodiesel // *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 2012. V. 89. №5. P. 925-933. <https://doi.org/10.1007/s11746-011-1979-5>

14. Liu B., Zhang Z. Catalytic conversion of biomass into chemicals and fuels over magnetic catalysts // *Acs Catalysis*. 2015. V. 6. №1. P. 326-338. <https://doi.org/10.1021/acscatal.5b02094>

15. Podolean I., Negoai A., Candu N., Tudorache M., Parvulescu V. I., Coman S. M. Cellulose capitalization to bio-chemicals in the presence of magnetic nanoparticle catalysts // *Topics in Catalysis*. 2014. V. 57. №17-20. P. 1463-1469. <https://doi.org/10.1007/s11244-014-0319-z>

16. Manaenkov O., Kislitsa O., Ratkevich E., Matveeva V., Sulman M., Sulman E. Ru-fe₃o₄-containing Polymeric Catalysts for Cellulose Hydrogenolysis // *Chemical Engineering Transactions*. 2019. V. 74. P. 79-84. <https://doi.org/10.3303/CET1974014>

17. Manaenkov O. V., Ratkevich E. A., Kislitsa O. V., Lawson B., Morgan D. G., Stepacheva A. A., et al. Magnetically recoverable catalysts for the conversion of inulin to mannitol // *Energy*. 2018. V. 154. P. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.103>

18. Elsayed I., Mashaly M., Eltaweel F., Jackson M. A. Dehydration of glucose to 5-hydroxymethylfurfural by a core-shell Fe₃O₄@ SiO₂-SO₃H magnetic nanoparticle catalyst // *Fuel*. 2018. V. 221. P. 407-416. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.135>

19. Ramazani A., Khoobi M., Sadri F., Tarasi R., Shafiee A., Aghahosseini H., Joo S. W. Efficient and selective oxidation of alcohols in water employing palladium supported nanomagnetic Fe₃O₄@ hyperbranched polyethylenimine (Fe₃O₄@ HPEI. Pd) as a new organic-inorganic hybrid nanocatalyst // *Applied Organometallic Chemistry*. 2018. V. 32. №1. P. e3908. <https://doi.org/10.1002/aoc.3908>

References:

1. Peralta-Ruiz, Y., Obregon, L. G., & Gonzalez-Delgado, A. D. (2018). Design of biodiesel and bioethanol production process from microalgae biomass using exergy analysis methodology. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 1045-1050. <https://doi.org/10.3303/CET1870175>
2. de Sousa, F. P., Cardoso, C. C., & Pasa, V. M. (2016). Producing hydrocarbons for green diesel and jet fuel formulation from palm kernel fat over Pd/C. *Fuel processing technology*, 143, 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.10.024>
3. Zhang, Z., Wang, Q., Chen, H., & Zhang, X. (2018). Hydroconversion of Waste Cooking Oil into Bio-Jet Fuel over a Hierarchical NiMo/USY@ Al-SBA-15 Zeolite. *Chemical Engineering & Technology*, 41(3), 590-597. <https://doi.org/10.1002/ceat.201600601>
4. Hachemi, I., Jenišťová, K., Mäki-Arvela, P., Kumar, N., Eränen, K., Hemming, J., & Murzin, D. Y. (2016). Comparative study of sulfur-free nickel and palladium catalysts in hydrodeoxygenation of different fatty acid feedstocks for production of biofuels. *Catalysis Science & Technology*, 6(5), 1476-1487. <https://doi.org/10.1039/C5CY01294E>
5. Galadima, A., & Muraza, O. (2015). Catalytic upgrading of vegetable oils into jet fuels range hydrocarbons using heterogeneous catalysts: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 29, 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.030>
6. Hollak, S. A., Ariëns, M. A., de Jong, K. P., & van Es, D. S. (2014). Hydrothermal deoxygenation of triglycerides over Pd/C aided by in situ hydrogen production from glycerol reforming. *ChemSusChem*, 7(4), 1057-1062. <https://doi.org/10.1002/cssc.201301145>
7. Kim, S. K., Lee, H. S., Hong, M. H., Lim, J. S., & Kim, J. (2014). Low-temperature, Selective Catalytic Deoxygenation of Vegetable Oil in Supercritical Fluid Media. *ChemSusChem*, 7(2), 492-500. <https://doi.org/10.1002/cssc.201300974>
8. Hossain, M. Z., Jhavar, A. K., Chowdhury, M. B. I., Xu, W. Z., Wu, W., Hiscott, D. V., & Charpentier, P. A. (2017). Using Subcritical Water for Decarboxylation of Oleic Acid into Fuel-Range Hydrocarbons. *Energy & Fuels*, 31(4), 4013-4023. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b03418>
9. Fang, X., Shi, Y., Wu, K., Liang, J., Wu, Y., & Yang, M. (2017). Upgrading of palmitic acid over MOF catalysts in supercritical fluid of n-hexane. *RSC Advances*, 7(64), 40581-40590. <https://doi.org/10.1039/C7RA07239B>
10. 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>
11. Stepacheva, A. A., Sidorov, A. I., Matveeva, V. G., Sulman, M. G., & Sulman, E. M. (2019). Fatty Acid Deoxygenation in Supercritical Hexane over Catalysts Synthesized Hydrothermally for Biodiesel Production. *Chemical Engineering & Technology*, 42(4), 780-787. <https://doi.org/10.1002/ceat.201800595>
12. Stepacheva, A., Semenova, A., Yablokova, N., & Kupriyanova, E. (2018). Supercritical deoxygenation of stearic acid in the presence of cobalt-containing catalyst. *Bulletin of Science and Practice*, 4(12), 62-68. (in Russian).

13. Guo, P., Huang, F., Zheng, M., Li, W., & Huang, Q. (2012). Magnetic solid base catalysts for the production of biodiesel. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 89(5), 925-933. <https://doi.org/10.1007/s11746-011-1979-5>
14. Liu, B., & Zhang, Z. (2015). Catalytic conversion of biomass into chemicals and fuels over magnetic catalysts. *Acs Catalysis*, 6(1), 326-338. <https://doi.org/10.1021/acscatal.5b02094>
15. Podolean, I., Negoii, A., Candu, N., Tudorache, M., Parvulescu, V. I., & Coman, S. M. (2014). Cellulose capitalization to bio-chemicals in the presence of magnetic nanoparticle catalysts. *Topics in Catalysis*, 57(17-20), 1463-1469. <https://doi.org/10.1007/s11244-014-0319-z>
16. Manaenkov, O., Kislitsa, O., Ratkevich, E., Matveeva, V., Sulman, M., & Sulman, E. (2019). Ru-Fe₃O₄-containing Polymeric Catalysts for Cellulose Hydrogenolysis. *Chemical Engineering Transactions*, 74, 79-84. <https://doi.org/10.3303/CET1974014>
17. Manaenkov, O. V., Ratkevich, E. A., Kislitsa, O. V., Lawson, B., Morgan, D. G., Stepacheva, A. A., ... Bronstein, L. M. (2018). Magnetically recoverable catalysts for the conversion of inulin to mannitol. *Energy*, 154, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.103>
18. Elsayed, I., Mashaly, M., Eltaweel, F., Jackson, M. A., & Hassan, E. B. (2018). Dehydration of glucose to 5-hydroxymethylfurfural by a core-shell Fe₃O₄@SiO₂-SO₃H magnetic nanoparticle catalyst. *Fuel*, 221, 407-416. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.135>
19. Ramazani, A., Khoobi, M., Sadri, F., Tarasi, R., Shafiee, A., Aghahosseini, H., & Joo, S. W. (2017). Efficient and selective oxidation of alcohols in water employing palladium supported nanomagnetic Fe₃O₄ @hyperbranched polyethylenimine (Fe₃O₄ @HPEI.Pd) as a new organic-inorganic hybrid nanocatalyst. *Applied Organometallic Chemistry*, 32(1), e3908. <https://doi.org/10.1002/aoc.3908>

Работа поступила
в редакцию 11.10.2019 г.

Принята к публикации
16.10.2019 г.

Ссылка для цитирования:

Stepacheva A. A., Semenova A. M., Yablokova N. S., Kupriyanova E. E., Rud D. V. Полимерный магнитоотделяемый катализатор для сверхкритического деоксигенирования жирных кислот // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. №11. С. 10-17. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/48/01>

Cite as (APA):

Stepacheva, A., Semenova, A., Yablokova, N., Kupriyanova, E., & Rud, D. (2019). Polymer Magnetically Separable Catalyst for Supercritical Deoxygenation of Fatty Acids. *Bulletin of Science and Practice*, 5(11), 10-17. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/48/01> (in Russian).