

УДК 544.478

**СОВРЕМЕННЫЕ КАТАЛИЗАТОРЫ
ДЛЯ ПРОЦЕССА КОНВЕРСИИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В ГЛИКОЛИ**

**MODERN CATALYSTS FOR THE PROCESS
OF CONVERSION CELLULOSE TO GLYCOLS**

©Филатова А. Е.

канд. хим. наук

Тверской государственной технической университет

г. Тверь, Россия, afilatowa@mail.ru

©Filatova A.

Ph.D., Tver State Technical University

Tver, Russia, afilatowa@mail.ru

©Шиманская Е. И.

канд. хим. наук

Тверской государственной технической университет

г. Тверь, Россия, shimanskaya-tstu@yandex.ru

©Shimanskaya E.

Ph.D., Tver State Technical University

Tver, Russia, shimanskaya-tstu@yandex.ru

Аннотация. Создание высокоэффективных каталитических систем для промышленных процессов тесно связано с активным развитием современной химии. Повышение эффективности катализаторов возможно обеспечить путем направленного формирования частиц металлов, проявляющих высокую каталитическую активность. В связи с этим, актуальными являются проблемы получения каталитических систем с обеспечением контроля над размером металлосодержащих частиц; стабилизации частиц полимерами; изучения физико-химических свойств таких катализаторов; исследования кинетики реакции и установления особенностей механизмов протекания процессов тонкого органического синтеза на полученных системах. Использование катализаторов на основе благородных металлов позволяет увеличить селективность и скорость промышленно-значимых процессов химической технологии. Среди каталитических процессов, одним из важных в практическом и теоретическом отношении является конверсия целлюлозы в гликоли. В настоящее время все большее внимание в научной и промышленной областях уделяется работам, направленным на разработку эффективных методов конверсии растительной биомассы в сырье для химической и топливной промышленности, в частности в этилен- и пропиленгликоль. Данные диолы являются важным сырьем, имеют широкое применение в производстве лекарственных препаратов, жидкого топлива, эмульгаторов, поверхностно-активных веществ, антифризов, смазочных материалов и растворителей, а также для синтеза полиэфирных волокон и смол. Большинство из применяемых в промышленности каталитических систем на основе никеля или рутения не обеспечивают высокую селективность и конверсию.

Abstract. Creation of highly efficient catalytic systems for industrial processes is closely connected with the active development of modern chemistry. An increase in the efficiency of the catalysts can be achieved by directional formation of metal particles exhibiting high catalytic activity. In this connection, the problems of obtaining catalytic systems with control over the size of metal-containing particles are topical; stabilization of particles by polymers; studying the physical and chemical properties of such catalysts; studies of the kinetics of the reaction and the establishment of specific features of the mechanisms of the processes of fine organic synthesis on the systems obtained. The use of noble metal catalysts makes it possible to increase the selectivity and speed of industrially significant processes in chemical technology. Among the catalytic processes, one of the most important in practical and theoretical terms is the conversion of cellulose to glycols. Currently, more attention is being paid in the scientific and industrial fields to work aimed at developing effective methods for converting plant biomass into raw materials for the chemical and fuel industries, in particular ethylene and propylene glycol. These diols are an important raw material, widely used in the manufacture of pharmaceuticals, liquid fuels, emulsifiers, surfactants, antifreezes, grease and solvents, as well as for the synthesis of polyester fibers and resins. Most of the nickel or ruthenium-based catalytic systems used in industry do not provide high selectivity for conversion. Using a catalyst containing Sn and Ni will improve the selectivity of the process and the activity of the catalyst.

Ключевые слова: гидрогенолиз целлюлозы, конверсия, селективность, полиолы, гликоли.

Keywords: hydrogenolysis of cellulose, conversion, selectivity, polyols, glycols.

Введение

Создание высокоэффективных каталитических систем для промышленных процессов тесно связано с активным развитием современной химии. Повышение эффективности катализаторов возможно обеспечить путем направленного формирования частиц металлов, проявляющих высокую каталитическую активность. В связи с этим, актуальными являются проблемы получения каталитических систем с обеспечением контроля над размером металлосодержащих частиц; стабилизации частиц полимерами; изучения физико-химических свойств таких катализаторов; исследования кинетики реакции и установления особенностей механизмов протекания процессов тонкого органического синтеза на полученных системах. Использование катализаторов на основе благородных металлов позволяет увеличить селективность и скорость промышленно-значимых процессов химической технологии. Среди каталитических процессов, одним из важных в практическом и теоретическом отношении является конверсия целлюлозы в гликоли. В настоящее время все большее внимание в научной и промышленной областях уделяется работам, направленным на разработку эффективных методов конверсии растительной биомассы в сырье для химической и топливной промышленности, в частности в этилен- и пропиленгликоль. Данные диолы являются важным сырьем, имеют широкое применение в производстве лекарственных препаратов, жидкого топлива, эмульгаторов, поверхностно-активных веществ, антифризов, смазочных материалов и растворителей, а также для синтеза полиэфирных волокон и смол.

Целлюлоза - одна из самых распространенных органических структур в природе. Уникальная особенность растительной биомассы состоит в том, что это возобновляемый

источник органического сырья, роль которого постоянно возрастает по мере истощения запасов возобновляемых топлив. На сегодняшний день актуальным является изучение процесса конверсии целлюлозы в гликоли - ценное сырье для химической промышленности. В настоящее время технологии переработки целлюлозы весьма разнообразны. Целлюлоза является крупнейшим в мире источником органического сырья. В то время как природа обновляет 40 миллиардов тонн целлюлозы в год, не более 200 млн. тонн этой непищевой биомассы обрабатываются, в основном в качестве сырья для производства бумаги и упаковки. Россия в развитии биоэнергетики отстает от западных стран. Однако, по мнению ряда специалистов, именно для России биотопливо второго поколения может стать удачным решением для удаленных регионов, не располагающих централизованными источниками энергоснабжения. Кроме того, Россия обладает большими ресурсами лесной и сельскохозяйственной биомассы для энергетического использования [1]. Как известно, целлюлоза представляет собой наиболее распространенный источник биомассы, и имеет внушительный потенциал в качестве альтернативы ископаемым видам топлива для устойчивого производства различного топлива и химикатов. Создание энергоносителей на основе возобновляемого сырья — один из путей перехода на альтернативные источники энергии. Вследствие наличия в составе целлюлозы большого количества гидроксильных групп, наиболее «удобным» способом ее конверсии является процесс гидрогенолиза до образования гликолей, таких как этиленгликоль (ЭГ), пропиленгликоль (ПГ).

ЭГ и ПГ являются важным сырьем и широко используются в производстве лекарственных препаратов, жидкого топлива, эмульгаторов, ПАВ, антифризов, смазочных материалов и растворителей, а также для синтеза полиэфирных волокон и смол, например, поли(этилентерефталата) и поли(этиленнафталата). Поскольку современное производство этих гликолей основано использовании невозобновляемого нефтяного сырья и не отличается экологической чистотой, актуальной является разработка новых эффективных и экологически чистых способов получения ПГ и ЭГ из целлюлозы, запасы которой возобновляемы и достаточно велики, чтобы полностью покрыть потребности химической промышленности в этих гликолях.

Основная часть

В последние несколько десятилетий подробно изучены процедуры и процессы конверсии целлюлозы. Усилия многих научных коллективов сосредоточены на разработке новых, эффективных и экологически безопасных способов получения полиспиртов из растительной биомассы, в первую очередь, из целлюлозы. Прямой гидрогенолиз целлюлозы позволяет получить низкомолекулярные (C₂-C₃) - полиолы, такие как этиленгликоль (ЭГ), 1,2-пропиленгликоль (1,2-ПГ) и гликоль (ГЛ), которые являются основой химических веществ и прекурсоров в синтезе топлива, сложных полиэфиров и других добавок [2]. В 2006 году Fukuoka и другие разработали одностадийную каталитическую реакцию селективной конверсии целлюлозы в гекситолы [3]. В этом процессе реакция гидролиза целлюлозы проходила одновременно с реакцией гидрирования глюкозы в присутствии катализатора Pt / Al₂O₃, что позволило достигнуть высокой конверсии. Более того, использование твердого катализатора и воды в качестве реакционной среды позволили сделать процесс экологически чистым.

Механизм гидрогенолиза целлюлозы в полиолы на бифункциональных катализаторах был построен на трех основных реакциях [4]. Во-первых, кислота катализирует гидролиз целлюлозы до водорастворимой глюкозы и олигосахаридов (расщепление связей С-О).

Затем, олигосахариды и глюкоза подвергаются расщеплению связей С-С с образованием гликолевого альдегида. Далее, происходит гидрирование гликолевого альдегида с помощью катализатора на основе переходного металла, которое позволяет получить целевые продукты (ЭГ, ПГ, ГЛ). Ранее был описан процесс гидрогенолиза целлюлозы с использованием катализаторов на основе металлов Ni, W, Ru, Pt, Pd и Cu [5-7]. Кроме того, для каждой реакции описанной выше требовалась отдельная каталитическая система, что приводило к высоким затратам на технологические процессы и к снижению выхода целевых продуктов [8, 9]. Стоит отметить, что при использовании катализатора на основе W_2C с нанесенным Ni или без него в качестве продукта реакции был получен этиленгликоль (EG), а не гекситолы [10-13]. По-видимому, такой выход ЭГ (75%), обусловлен высокой эффективностью вольфрама при разрыве С-С связей в глюкозе [13].

Создание ультрафункциональных катализаторов является наиболее перспективным направлением исследований. Создание таких катализаторов позволит упростить процесс гидрогенолиза целлюлозы и сделать его одностадийным. Одностадийный гидрогенолиз целлюлозы до полиспиртов (*one-pot* процесс), в присутствии гетерогенных металлосодержащих композитов известен достаточно давно, однако проведение этого процесса с использованием традиционных металлических катализаторов не позволяет получать высокие выходы целевых продуктов [14, 15]. Zhang и другие в работах [13, 16] описывают разработанные катализаторы для селективного получения ЭГ. Было показано, что при использовании катализаторов на основе вольфрама конверсия целлюлозы достигала 100%, а выход ЭГ 75%. Авторы работы [17] изучили влияние мольного состава Ni / W / SiO_2 - Al_2O_3 катализаторов на конверсию целлюлозы в полиолы. Коллективом ученых в статье [18] было обнаружено, что выход полиолов был связан с общей кислотностью носителя. Кроме того авторы отметили заметное изменение распределения продуктов в реакции в зависимости от используемых катализаторов (Ru / C и WO_3 / C). В литературных источниках также встречается большое количество работ направленных на исследование катализаторов на основе щелочных оксидов ZnO, CaO, MgO и оснований ($Ca(OH)_2$, $Ba(OH)_2$) [19-21].

В работах [16, 22, 23] показано, что наличие даже маленького количества Ni в W_2C или в W катализаторе на основе активированного угля (AC) позволяет значительно увеличить конверсию целлюлозной биомассы в 1,2-пропиленгликоль. Кроме того авторы работы [1] рассмотрели возможный путь реакции с использованием Ni- W_2C / AC. Однако при использовании Ni- W_2C / AC было обнаружено спекание кристаллов W_2C в ходе синтеза катализатора [1]. Авторы работы [16] предложили новый способ синтеза Ni- W_2C / AC катализаторов – метод постпропитки никелем, после формирования кристаллов W_2C . Данный метод позволил избежать спекания кристаллов W_2C , что способствовало достижению более высокой селективности и конверсии при протекании реакции. Авторы работы [23] на основании проведенных исследований утверждают, что необходим поиск полимерной подложки для биметаллических катализаторов. В кинетических исследованиях, проведенных в работе [24] применялись биметаллические Ni/Pt катализаторы на оксиде алюминия и оксиде циркония. В работе [19] показали, что биметаллические катализаторы синтезированные методом влажной пропитки позволяют получить более высокую конверсию и селективность, чем монометаллические. В исследовании [25] было показано влияние атомного соотношения в диапазоне 0-0,2 Sn/Ni в катализаторах на основе оксида алюминия или оксида циркония на конверсию и селективность реакции. Тестирование катализаторов проводилось при 210 °C в среде водорода при величине парциального давления 6 МПа [25]. Guanfeng Liang и другие в статье [26] отмечают, что Ni в ходе реакции

при высоких температурах быстро дезактивируется, что делает его использование не выгодным. В своей работе [21] авторы предлагают использовать биметаллические катализаторы Pt/Ni для реакции гидролитического гидрирования целлюлозы. Во время синтеза наночастицы Pt/Ni формируются на поверхности платинового сплава с цеолитом [26]. Большое внимание исследователей в настоящее время привлекает синтез новых биметаллических катализаторов для процесса конверсии целлюлозы, а также поиск оптимального носителя для биметаллических катализаторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований в рамках проекта 15-08-00245 А.

Список литературы:

1. Binder J. B., Raines R. T. Simple chemical transformation of lignocellulosic biomass into furans for fuels and chemicals // J. Am. Chem. Soc. 2009. V. 131. P. 1979-1985.
2. Liu Y., Luo C., Liu H. C. Tungsten promoted selective conversion of cellulose into propylene glycol and ethylene glycol on a ruthenium catalyst // Angew. Chem. Int. Ed. 2012. 124. P. 3303-3307.
3. Fukuoka A., Dhepe P. L. Catalytic Conversion of Cellulose into Sugar Alcohols // Angew. Chem. V. 118. P. 5285-5287.
4. Wang A. Q., Zhang T. One-pot conversion of cellulose to ethylene glycol with multifunctional tungsten-based catalysts // Acc. Chem. Res. 2013. V. 46. P. 1377-1386.
5. Liu Q. Y., Liao Y. H., Wang T. J., Cai C. L., Zhang Q., Tsubaki N., Ma L. L. One-pot transformation of cellulose to sugar alcohols over acidic metal phosphates combined with Ru/C // Ind. Eng. Chem. Res. 2014. V. 53. P. 12655-12664.
6. Liu C. W., Zhang C. H., Liu K. K., Wang Y., Fan G. X., Sun S. K., Xu J., Zhu Y. L., Li Y. W. Aqueous-phase hydrogenolysis of glucose to value-added chemicals and biofuels: A comparative study of active metals // Biomass Bioenergy. 2015. V. 72. P. 189-199.
7. Xiao Z. H., Jin S. H., Pang M., Liang C. H. Conversion of highly concentrated cellulose to 1,2-propanediol ethylene glycol over highly efficient CuCr catalysts // Green Chem. 2013. V. 15. P. 891-895.
8. Denard C. A., Hartwig J. F., Zhao H. M. Multistep one-pot reaction combining biocatalysts and chemical catalysts for asymmetric synthesis // ACS Catal. 2013. V. 3. P. 2856-2864.
9. Zhang J. Y., Hou B. L., Wang A. Q., Li Z. L., Wang H., Zhang T. Kinetic study of the competitive hydrogenation of glycolaldehyde and glucose on Ru/C with or without AMT // AIChE J. 2015. V. 61. P. 224-238.
10. Ji N., Zhang T., Zheng M. Y., Wang A. Q., Wang H., Wang X. D., Chen J. G. // Angew. Chem. 2008. V. 120. P. 8638-8641.
11. Ji N., Zhang T., Zheng M., Wang A., Wang H., Wang X., Shu Yu., Stottlemyer A. L., Chen J. G. Catalytic conversion of cellulose into ethylene glycol over supported carbide catalysts // Catalysis Today. 2009. V. 147. №2. P. 77-85. DOI: 10.1016/j.cattod.2009.03.012.
12. Zhang Y., Wang A., Zhang T. A new 3D mesoporous carbon replicated from commercial silica as a catalyst support for direct conversion of cellulose into ethylene glycol // Chemical Communications. 2010. V. 46. №6. P. 862-864. DOI: 10.1039/B919182H.
13. Zheng M. Y., Wang A. Q., Ji N., Pang J. F., Wang X. D., Zhang T. Transition metal-tungsten bimetallic catalysts for the conversion of cellulose into ethylene glycol // ChemSusChem. 2010. V. 3. №1. P. 63-66. DOI: 10.1002/cssc.200900197.

14. Matveeva V. G., Sulman E. M., Manaenkov O. V., Filatova A. E., Kislitza O. V., Sidorov A. I., Doluda V. Y., Sulman M. G., Rebrov E. V. Hydrolytic hydrogenation of cellulose in subcritical water with the use of the Ru-containing polymeric catalysts // *Catalysis Today*. 2017. V. 280. P. 45-50.

15. Манаенков О. В., Филатова А. Е., Макеева О. Ю., Кислица О. В., Долуда В. Ю., Сидоров А. И., Матвеева В. Г., Сульман Э. М. Ru-содержащие катализаторы на полимерной основе для конверсии целлюлозы в полиолы // *Катализ в промышленности*. 2014. №2. С. 65-72.

16. Ji N., Zheng M. Y., Wang A. Q., Zhang T., Chen J. G. Nickel-promoted tungsten carbide catalysts for the cellulose conversion: Effect of preparation methods // *ChemSusChem*. 2012. V. 5. P. 939-944.

17. Beak I. G., You S. J., Park E. D. Direct conversion of cellulose into polyols over Ni/W/SiO₂-Al₂O₃ // *Bioresour. Technol.* 2012. V. 114. P. 684-690.

18. Liu Y., Liu H. C. Kinetic insight into the effect of the catalytic functions on selective conversion of cellulose to polyols on carbon-supported WO₃ and Ru catalysts // *Catal. Today*. 2016. V. 269. P. 74-81.

19. Hirano Y., Sagata K., Kita Y. Selective transformation of glucose into propylene glycol on Ru/C catalysts combined with ZnO under low hydrogen pressures // *Appl. Catal. A*. 2015. V. 502. P. 1-7.

20. Chen X. G., Wang X. C., Yao S. X., Mu X. D. Hydrogenolysis of biomass-derived sorbitol to glycols and glycerol over Ni-MgO catalysts // *Catal. Commun.* 2013. V. 39. P. 86-89.

21. Sotak T., Schmidt T., Hronec M. Hydrogenolysis of polyalcohols in the presence of metal phosphide catalysts // *Appl. Catal. A*. 2013. V. 459. P. 26-33.

22. Zhou L., Wang A., Li Ch., Zheng M., Zhang T. Selective Production of 1,2-Propylene Glycol from Jerusalem Artichoke Tuber using Ni-W₂C/AC Catalysts // *ChemSusChem*. 2012. V. 5. P. 932-938.

23. Fabicovicova K., Malter O., Lucas M., Claus P. Hydrogenolysis of cellulose to valuable chemicals over activated carbon supported mono- and bimetallic nickel/tungsten catalysts // *Green Chem.* 2014. V. 16. P. 3580-3588.

24. Tanksale A., Beltramini J. N., Lu G. Q. M. Conversion of Cellulose to H₂ Using Metals Supported Mesoporous Catalysts // *nacatsoc.org*.

25. Deng T., Liu H. Direct conversion of cellulose into acetol on bimetallic Ni-SnO_x/Al₂O₃ catalysts // *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 2014. V. 388-389. P. 66-73.

26. Liang G., He L., Arai M., Zhao F. The Pt-Enriched PtNi Alloy Surface and its Excellent Catalytic Performance in Hydrolytic Hydrogenation of Cellulose // *ChemSusChem*. 2014. V. 7. №5. P. 1415-1421.

References:

1. Binder, J. B., & Raines, R. T. (2009). Simple chemical transformation of lignocellulosic biomass into furans for fuels and chemicals. *J. Am. Chem. Soc.*, 131, 1979-1985

2. Liu, Y., Luo, C., & Liu, H. C. (2012). Tungsten promoted selective conversion of cellulose into propylene glycol and ethylene glycol on a Ruthenium catalyst. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 124, 3303-3307.

3. Fukuoka, A., & Dhepe, P. L. (2006). Catalytic Conversion of Cellulose into Sugar Alcohols. *Angew. Chem.*, 118, 5285-5287

4. Wang, A. Q., & Zhang, T. (2013). One-pot conversion of cellulose to ethylene glycol with multifunctional tungsten-based catalysts. *Acc. Chem. Res.*, 46, 1377-1386
5. Liu, Q. Y., Liao, Y. H., Wang, T. J., Cai, C. L., Zhang, Q., Tsubaki, N., & Ma, L. L. (2014). One-pot transformation of cellulose to sugar alcohols over acidic metal phosphates combined with Ru/C. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53, 12655-12664
6. Liu, C. W., Zhang, C. H., Liu, K. K., Wang, Y., Fan, G. X., Sun, S. K., Xu, J., Zhu, Y. L., & Li, Y. W. (2015). Aqueous-phase hydrogenolysis of glucose to value-added chemicals and biofuels: A comparative study of active metals. *Biomass Bioenergy*, 72, 189-199
7. Xiao, Z. H., Jin, S. H., Pang, M., & Liang, C. H. (2013). Conversion of highly concentrated cellulose to 1,2-propanediol ethylene glycol over highly efficient CuCr catalysts. *Green Chem.*, 15, 891-895
8. Denard, C. A., Hartwig, J. F., Zhao, H. M. (2013). Multistep one-pot reaction combining biocatalysts and chemical catalysts for asymmetric synthesis. *ACS Catal.*, 3, 2856-2864
9. Zhang, J. Y., Hou, B. L., Wang, A. Q., Li, Z. L., Wang, H., & Zhang, T. (2015). Kinetic study of the competitive hydrogenation of glycolaldehyde and glucose on Ru/C with or without AMT. *AIChE J.*, 61, 224-238
10. Ji, N., Zhang, T., Zheng, M. Y., Wang, A. Q., Wang, H., Wang, X. D., & Chen, J. G. (2008). *Angew. Chem.*, 120, 8638-8641
11. Ji, N., Zhang, T., Zheng, M., Wang, A., Wang, H., Wang, X., Shu, Yu., Stottlemeyer, A. L., & Chen, J. G. (September 2009). Catalytic conversion of cellulose into ethylene glycol over supported carbide catalysts. *Catalysis Today*, 147, (2), 77-85. doi:10.1016/j.cattod.2009.03.012
12. Zhang, Y., Wang, A., & Zhang, T. (2010). A new 3D mesoporous carbon replicated from commercial silica as a catalyst support for direct conversion of cellulose into ethylene glycol. *Chemical Communications*, 46, (6), 862-864. doi:10.1039/B919182H
13. Zheng, M. Y., Wang, A. Q., Ji, N., Pang, J. F., Wang, X. D., & Zhang, T. (2010). Transition metal-tungsten bimetallic catalysts for the conversion of cellulose into ethylene glycol // *ChemSusChem*, 3, (1), 63-66. doi:10.1002/cssc.200900197
14. Matveeva, V. G., Sulman, E. M., Manaenkov, O. V., Filatova, A. E., Kislitza, O. V., Sidorov, A. I., Doluda, V. Y., Sulman, M. G., & Rebrov, E. V. (2017). Hydrolytic hydrogenation of cellulose in subcritical water with the use of the Ru-containing polymeric catalysts. *Catalysis Today*, 280, 45-50
15. Manaenkov, O. V., Filatova, A. E., Makeeva, O. Y., Kislitsa, O. V., Doluda, V. Y., Sidorov, A. I., Matveeva, V. G., & Sulman, E. M. (2014). Ru-Containing catalysts on polymer supports for converting cellulose into polyols. *Catalysis in Industry*, 6, (2), 150-157. doi:10.1134/S2070050414020081
16. Ji, N., Zheng, M. Y., Wang, A. Q., Zhang, T., & Chen, J. G. (2012). Nickel-promoted tungsten carbide catalysts for the cellulose conversion: Effect of preparation methods. *ChemSusChem*, 5, 939-944
17. Beak, I. G., You, S. J., & Park, E. D. (2012). Direct conversion of cellulose into polyols over Ni/W/SiO₂-Al₂O₃. *Bioresour. Technol.*, 114, 684-690
18. Liu, Y., & Liu, H. C. (2016). Kinetic insight into the effect of the catalytic functions on selective conversion of cellulose to polyols on carbon-supported WO₃ and Ru catalysts. *Catal. Today*, 269, 74-81
19. Hirano, Y., Sagata, K., & Kita, Y. (2015). Selective transformation of glucose into propylene glycol on Ru/C catalysts combined with ZnO under low hydrogen pressures. *Appl. Catal. A.*, 502, 1-7

20. Chen, X. G., Wang, X. C., Yao, S. X., & Mu, X. D. (2013). Hydrogenolysis of biomass-derived sorbitol to glycols and glycerol over Ni-MgO catalysts. *Catal. Commun.*, 39, 86-89
21. Sotak T., Schmidt T., & Hronec M. (2013). Hydrogenolysis of polyalcohols in the presence of metal phosphide catalysts. *Appl. Catal. A.*, 459, 26-33
22. Zhou, L., Wang, A., Li, Ch., Zheng, M., & Zhang, T. (2012). Selective Production of 1,2-Propylene Glycol from Jerusalem Artichoke Tuber using Ni-W₂C/AC Catalysts. *ChemSusChem*, 5, 932-938
23. Fabičovicová, K., Malter, O., Lucas, M., & Claus, P. (2014). Hydrogenolysis of cellulose to valuable chemicals over activated carbon supported mono- and bimetallic nickel/tungsten catalysts. *Green Chem.*, 16, 3580-3588
24. Tanksale, A., Beltramini, J. N., & Lu, G. Q. M. Conversion of Cellulose to H₂ Using Metals Supported Mesoporous Catalysts // nacatsoc.org.
25. Deng, T., & Liu, H. (2014). Direct conversion of cellulose into acetol on bimetallic Ni-SnO_x/Al₂O₃ catalysts. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 388-389, 66-73
26. Liang, G., He, L., Arai, M., & Zhao, F. (2014). The Pt-Enriched PtNi Alloy Surface and its Excellent Catalytic Performance in Hydrolytic Hydrogenation of Cellulose. *ChemSusChem*, 7, (5), 1415-1421

Работа поступила
в редакцию 21.10.2017 г.

Принята к публикации
25.10.2017 г.

Ссылка для цитирования:

Филатова А. Е., Шиманская Е. И. Современные катализаторы для процесса конверсии целлюлозы в гликоли // Бюллетень науки и практики. Электрон. журн. 2017. №11 (24). С. 36-43. Режим доступа: <http://www.bulletennauki.com/filatova-shimanskaya> (дата обращения 15.11.2017).

Cite as (APA):

Filatova A., Shimanskaya E. (2017). Modern catalysts for the process of converting cellulose to glycols. *Bulletin of Science and Practice*, (11), 36-43