

Научная статья

УДК 544.47

DOI: 10.15372/KhUR2025631

EDN: GEMRSF

## Структурированные катализаторы паровой и паровоздушной конверсии бутанола-1 в синтез-газ

В. Н. РОГОЖНИКОВ<sup>✉</sup>, Д. И. ПОТЕМКИН, О. А. СТОНКУС, К. И. ШЕФЕР, А. Н. САЛАНОВ,  
В. П. ПАХАРУКОВА, П. В. СНЫТНИКОВ

*Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия*

*E-mail: rvn@catalysis.ru<sup>✉</sup>, potema@catalysis.ru, stonkus@catalysis.ru, shefer@catalysis.ru, salanov@catalysis.ru, verapakharukova@yandex.ru, pvsnyt@catalysis.ru*

### Аннотация

Реакции паровой и паровоздушной конверсии бутанола позволяют получать синтез-газ, который может быть использован в качестве сырья в ряде химических приложений или топлива для твердооксидных топливных элементов. Эффективность протекания этих реакций в значительной мере определяется теплообменом. В случае эндотермической реакции – паровой конверсии метана, необходимо обеспечить передачу тепла от стенок реактора внутрь слоя катализатора. При паровоздушной конверсии, являющейся термонеutralной или слабо экзотермической реакцией, в лобовом слое катализатора возникает локальный перегрев, тепловой эффект которого необходимо перераспределить по всему слою для компенсации эндотермического эффекта, преобладающего в хвостовой части. Для повышения теплопереноса в данной работе использованы структурированные катализаторы на основе теплопроводящих подложек – металлических сеток. Такие катализаторы представляют собой сложный композитный материал с многоуровневой структурой “структурированная металлическая подложка – структурный оксидный компонент – активный оксид – наночастицы металлов или сплавов”, который совмещает в себе функции теплообменника, распределителя потока и, собственно, катализатора, что позволяет контролировать тепло- и массоперенос, регулировать газодинамическое сопротивление в реакторе и оптимизировать количество каталитического материала. В настоящей работе представлены результаты по приготовлению и исследованию физико-химических и каталитических свойств Pt-, Rh-, Pd-, Ru- и Ni-содержащих структурированных катализаторов, нанесенных на фехралевый (FeCrAl) сетчатый носитель. Приготовленные структурированные катализаторы были испытаны в реакциях паровой и автотермической конверсии *n*-бутанола в синтез-газ. Наибольшую активность в указанных реакциях проявил родиевый структурированный катализатор. Краткосрочные лабораторные ресурсные испытания в течение 15 ч не выявили наличие сажи на поверхности катализатора, а состав продуктов реакции был близок к термодинамически равновесному. Этот катализатор может быть рекомендован для использования в риформерах паровой и паровоздушной конверсии бутанола-1 с целью получения синтез-газа.

**Ключевые слова:** автотермический риформинг, паровой риформинг, бутанол, водород, структурированный катализатор

**Финансирование:** работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-79-00208), <https://rscf.ru/project/22-79-00208/>.

**Для цитирования:** Рогожников В. Н., Потемкин Д. И., Стонкус О. А., Шефер К. И., Саланов А. Н., Пахарукова В. П., Снытников П. В. Структурированные катализаторы паровой и паровоздушной конверсии бутанола-1 в синтез-газ // Химия в интересах устойчивого развития. 2025. Т. 33, № 1. С. 67–74. DOI: 10.15372/KhUR2025631. EDN: GEMRSF.

Original article

## Structured catalysts for steam and steam-air conversion of butanol-1 into synthesis gas

V. N. ROGOZHNIKOV<sup>✉</sup>, D. I. POTEKIN, O. A. STONKUS, K. I. SHEFER, A. N. SALANOV,  
V. P. PAKHARUKOVA, P. V. SNYTNIKOV

*Boreshkov Institute of Catalysis, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

*E-mail: rvn@catalysis.ru<sup>✉</sup>, potema@catalysis.ru, stonkus@catalysis.ru, shefer@catalysis.ru, salanov@catalysis.ru, verapakharukova@yandex.ru, pvsnyt@catalysis.ru*

### Abstract

Steam and steam-air reforming of butanol allows obtaining synthesis gas that can be used as a feedstock in a number of chemical applications or as a fuel for solid oxide fuel cells. The efficiency of these reactions is largely determined by heat transfer. In the case of steam reforming of methane, which is an endothermic reaction, it is necessary to provide heat transfer from the reactor walls into the catalyst layer. During steam-air conversion, which is a thermoneutral or weakly exothermic reaction, local overheating occurs in the front layer, the thermal effect of which must be redistributed over the catalyst layer to compensate for the endothermic effect prevailing in the tail section. To increase heat transfer, structured catalysts based on heat-conducting substrates, namely metal meshes, are used in this work. Such catalysts are a complex composite material with a multi-level structure: structured metal substrate – structural oxide component – active oxide – nanoparticles of metals or alloys, which combines the functions of a heat exchanger, a flow distributor and the catalyst itself. This allows you to control heat and mass transfer, regulate gas-dynamic resistance in the reactor and optimise the amount of catalytic material. In this work, the results of the preparation and study of the physicochemical and catalytic properties of Pt, Rh, Pd, Ru, Ni-containing structured catalysts supported on a ferral (FeCrAl) mesh support are presented. The prepared structured catalysts were tested in the reactions of steam and autothermal conversion of *n*-butanol into synthesis gas. The highest activity in these reactions was shown by the rhodium structural catalyst. Short-term laboratory resource tests for 15 h did not reveal the presence of soot on the surface of the catalyst, and the composition of the reaction products was close to thermodynamic equilibrium. This catalyst can be recommended for use in reformers for steam and steam-air conversion of butanol-1 to produce synthesis gas.

**Keywords:** autothermal reforming, steam reforming, butanol, hydrogen, structured catalyst

### ВВЕДЕНИЕ

Топливом для топливных элементов служит водород или водородсодержащий газ, который может быть получен из различных носителей водорода, в том числе и из возобновляемых растительных источников. К таким источникам можно отнести различные кислородсодержащие органические соединения, в частности, спирты – этанол, пропанол, бутанол и т. д. Одним из методов получения бутанола служит ацетонобутиловое брожение, которое наравне с получением этанола считается биологическим способом производства этого ценного химического соединения. Бутанол может рассматриваться в качестве перспективного носителя во-

дорода (источника водородсодержащего газа), для получения которого необходимо провести паровую или паровоздушную конверсию. Эти процессы протекают в присутствии катализаторов, в которых в качестве носителя выступают различные оксиды переходных и редкоземельных металлов, а в роли активного компонента – переходные металлы.

Среди катализаторов паровой конверсии био-бутанола (смесь бутанол/ацетон/этанол = 6 : 3 : 1) рассматривали кобальтовые и иридиевые катализаторы на различных носителях (ZnO, TiO<sub>2</sub>, CeO<sub>2</sub>) [1]. Наилучшими характеристиками обладал Ir-Co/ZnO-катализатор, но отсутствие детальных данных физико-химических исследований не позволило обоснованно определить, с

чем связана его более высокая активность по сравнению с образцами, нанесенными на другие носители. Последующие сравнительные исследования кобальт-иридиевых катализаторов при варьировании носителей ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2$ ) показали, что частицы кобальта имеют наименьший размер при нанесении на церий-циркониевый носитель. Это коррелировало с его наибольшей активностью по сравнению с другими образцами [2]. Проведенные исследования влияния активного компонента (Ru, Rh, Ir и Pd) на конверсию биобутанола на цинковом носителе выявили, что добавление родия в состав катализатора позволяет увеличить выход водорода и снизить зауглероживание катализатора [3].

Аналогичные исследования были проведены и для родиевых катализаторов, нанесенных на оксид циркония [4, 5] и оксид алюминия [6], которые обладали высокой активностью и обеспечивали количественный состав продуктов реакции, близкий к термодинамически равновесным значениям. Исследования нанесенных на модифицированный оксид алюминия никельсодержащих катализаторов показали, что эти системы обеспечивают полную конверсию бутанола в синтез-газ [7]. С другой стороны, были продемонстрированы преимущества использования в качестве носителя оксида церия [8] или носителей на основе твердых растворов церий-циркониевых оксидов [9] по сравнению с оксидом алюминия, часто используемого для приготовления никелевых катализаторов, испытанных в паровой конверсии бутанола. Стоит отметить, что одним из активных компонентов катализаторов конверсии бутанола-1 может выступать также рутений [10].

На основании анализа литературных данных, можно сделать вывод, что высокую активность в паровой или автотермической конверсии бутанола проявляют образцы, где в качестве активного компонента выступает родий, рутений, никель или кобальт. В зависимости от используемого носителя определенную активность могут проявлять платина и палладий. Среди носителей наиболее перспективны оксид церия и твердые растворы церий-циркониевых оксидов, т. е. системы, обладающие повышенной кислородной подвижностью. Такая особенность позволяет добиваться увеличения активности катализатора и его устойчивости к зауглероживанию.

Исследуемые реакции получения синтез-газа из бутанола требуют подвода тепла (в случае проведения паровой конверсии) внутрь каталитического слоя или передачи тепла из лобовой

зоны в хвостовую часть катализатора (при автотермической конверсии). Поэтому одним из ключевых параметров катализатора является его теплопроводность. Существенного улучшения этой характеристики можно добиться за счет использования подложек из металлических материалов, например, фехрала.

Цель данной работы – приготовление структурированных катализаторов на основе теплопроводящей подложки из фехралевого сплава, в которых в качестве носителя активного компонента выступает смешанный церий-циркониевый оксид с нанесенным на него активным компонентом (Pt, Pd, Rh, Ru или Ni), и сравнение их каталитической эффективности в процессах паровой и автотермической конверсии *n*-бутанола.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве металлической подложки использовали сетку из нержавеющей фехральной стали (марка стали – X23Ю5Т следующего состава, мас. %: Cr – 22.15, Al – 5.1, сумма C, Ni, S, P, Ti, Mn, Si – 1.0, Fe – остальное; размер ячейки – 0.5 мм, диаметр проволоки – 0.25 мм, производитель – АО “НПО Союзнихром”, Россия). Были использованы блоки сотового типа из плоских сеток, скрученных в спираль Архимеда. Для увеличения адгезии и площади поверхности на металлическую сетку (далее FeCrAl) наносили слой  $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$  (6 мас. %) по модифицированной методике Байера, описанной в [11]. Последующее нанесение твердого раствора  $\text{Ce}_{0.75}\text{Zr}_{0.25}\text{O}_2$  проводили из водных растворов нитратов церия и циркониила методом обратного осаждения водным раствором аммиака. Для этого структурированный блок с нанесенным слоем оксида алюминия пропитывали водным раствором нитратов церия и циркониила с концентрациями 0.75 и 0.25 М соответственно, затем избыток раствора отделяли центрифугированием, структурированный блок помещали в водный раствор 12.5 мас. % аммиака на 2–5 мин, далее блок промывали дистиллированной водой до нейтрального значения pH и высушивали. Данная процедура повторялась до достижения привеса в 8 мас. % для получения более высокого содержания церий-циркониевого носителя активного компонента относительно нанесенного оксида алюминия. После этого блок прокачивали при 800–850 °С в течение 2 ч. В итоге был получен структурированный носитель активного компонента –  $\text{Ce}_{0.75}\text{Zr}_{0.25}\text{O}_2/\theta\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{FeCrAl}$  (далее CZAFCА).

Для приготовления катализаторов 1%Pt(Rh, Ru, Pd)/CZAFCA использовали сорбционно-гидролитический метод осаждения активного компонента [12]. После осаждения катализаторы восстанавливали в токе 5 об. %  $H_2/N_2$  с нагревом от комнатной температуры до 250 °С со скоростью 5 °С/мин.

Никельсодержащие катализаторы были приготовлены методом пропитки по влагоемкости. В качестве предшественника никеля использовали нитрат никеля. Пропитанный образец вначале сушили при 80 °С, затем при 120 °С и далее прокаливали при 800–850 °С в течение 2 ч. Катализатор восстанавливали в токе 5 об. %  $H_2/N_2$  с нагревом от комнатной температуры до 800 °С со скоростью 5 °С/мин.

Синтезированные катализаторы исследовали в процессах паровой и автотермической конверсии бутанола-1. Испытания были проведены в проточном кварцевом реакторе, для подачи жидких реагентов использовали плунжерные насосы, для подачи газообразных реагентов – газовые расходомеры. Температуру в начале и конце каталитического блока измеряли термомпарами. Анализ продуктов реакции выполняли с помощью газохроматографического комплекса ГХ-1000 (Хромос, Россия), оборудованного двумя детекторами по теплопроводности (ДТП) и пламенно-ионизационным детектором (ПИД) с использованием двух насадочных колонок Porapak Q (Agilent, США) и CaA (Россия) и капиллярной колонки Plot Silica (ХРОМОС Инжиниринг, Россия). Определение концентраций  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  проводили при помощи ДТП после разделения газовой смеси на насадочных колонках, для анализа органических соединений (углеводородов, спиртов и т. д.) использовали ПИД в комбинации с капиллярной колонкой. Все эксперименты, касающиеся паровой и автотермической конверсии, осуществляли в диапазоне 400–800 °С, поскольку при более низких температурах, согласно термодинамическим расчетам, наблюдается большое содержание метана в продуктах реакции и возможно протекание побочного процесса зауглероживания катализатора.

Физико-химические свойства синтезированных катализаторов исследовали методами рентгенофазового анализа (РФА), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), низкотемпературной адсорбции азота (метод БЭТ), импульсной хемосорбции  $CO$ , термопрограммируемого окисления (ТПО). Для получения рентгенограмм использовали дифрактометр Thermo

Techno ARL X'TRA (Thermo Fisher Scientific (Ecublens) SARL, Швейцария). Сканирование проводилось в диапазоне углов 10–75° по 2θ с шагом 0.1° и временем накопления в каждой точке 10 с. Удельную поверхность пор измеряли методом БЭТ с помощью прибора ASAP-2400 (Micromeritics, США). Морфологию и микроструктуру поверхности изучали по СЭМ-изображениям, выполненным на сканирующем электронном микроскопе JSM-6460 LV (JEOL, Япония). Структуру и размер частиц активного компонента исследовали методом ПЭМ с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM 2010 (JEOL, Япония), разрешение 1.4 Å, напряжение 200 кВ. Метод ТПО выполнен с применением прибора TPDRO 1100 (Thermo Scientific, США).

Для проведения хемосорбции  $CO$  была использована установка, собранная на основе газового хроматографа. Дисперсность металлических частиц (средний размер) оценивали методом импульсной хемосорбции  $CO$  в  $H_2$  при 20 °С, предполагая, что каждый поверхностный атом металла адсорбирует молекулу  $CO$  при молярном соотношении  $CO/активный\ металл = 1.5$ . Перед измерением хемосорбции  $CO$  катализаторы восстанавливали в токе водорода при 350 °С в течение 30 мин.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По термодинамическим расчетам, которые выполнены в программе HSC 7.0 (рис. 1) для паровой и автотермической конверсии бутанола-1, определены границы образования углерода и показано, что необходимо использовать молярное соотношение  $H_2O/бутанол$  более 6, иначе реакция будет протекать в области температур, где большая вероятность формирования сажи. При автотермической конверсии молярное соотношение  $O_2/бутанол$  рационально использовать не менее 0.6.

На рис. 2, а приведено изображение фехральной сетки с нанесенными слоями оксида алюминия, носителя активного компонента и каталитическим покрытием, а на рис. 2, б–г представлены данные физико-химических методов исследования полученных образцов: дифрактограммы фехральной сетки и структурированного катализатора с нанесенным каталитическим покрытием (б), изображения сканирующего (в) и просвечивающего электронного микроскопа (г). По данным исследований методом БЭТ, удель-

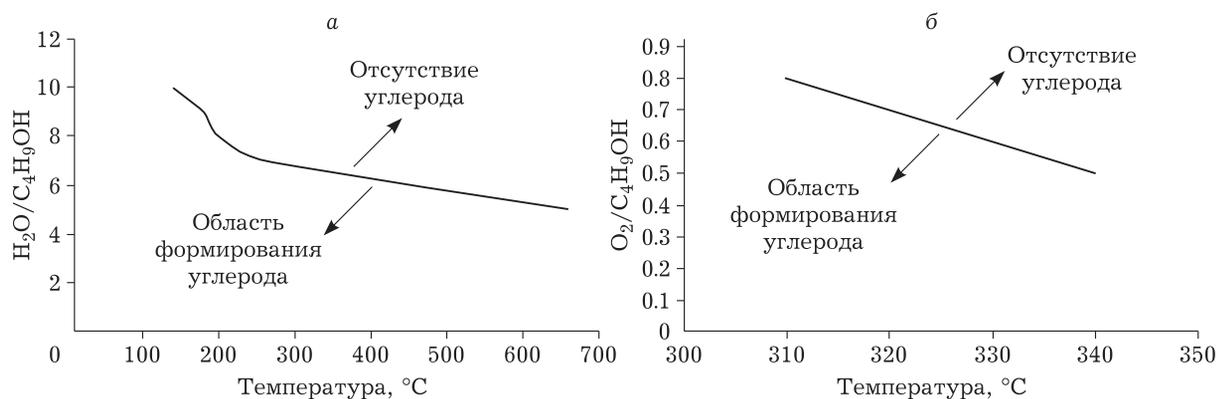


Рис. 1. Границы образования углерода для паровой (а) и паровоздушной (б) конверсии бутанола-1 по данным термодинамических расчетов.

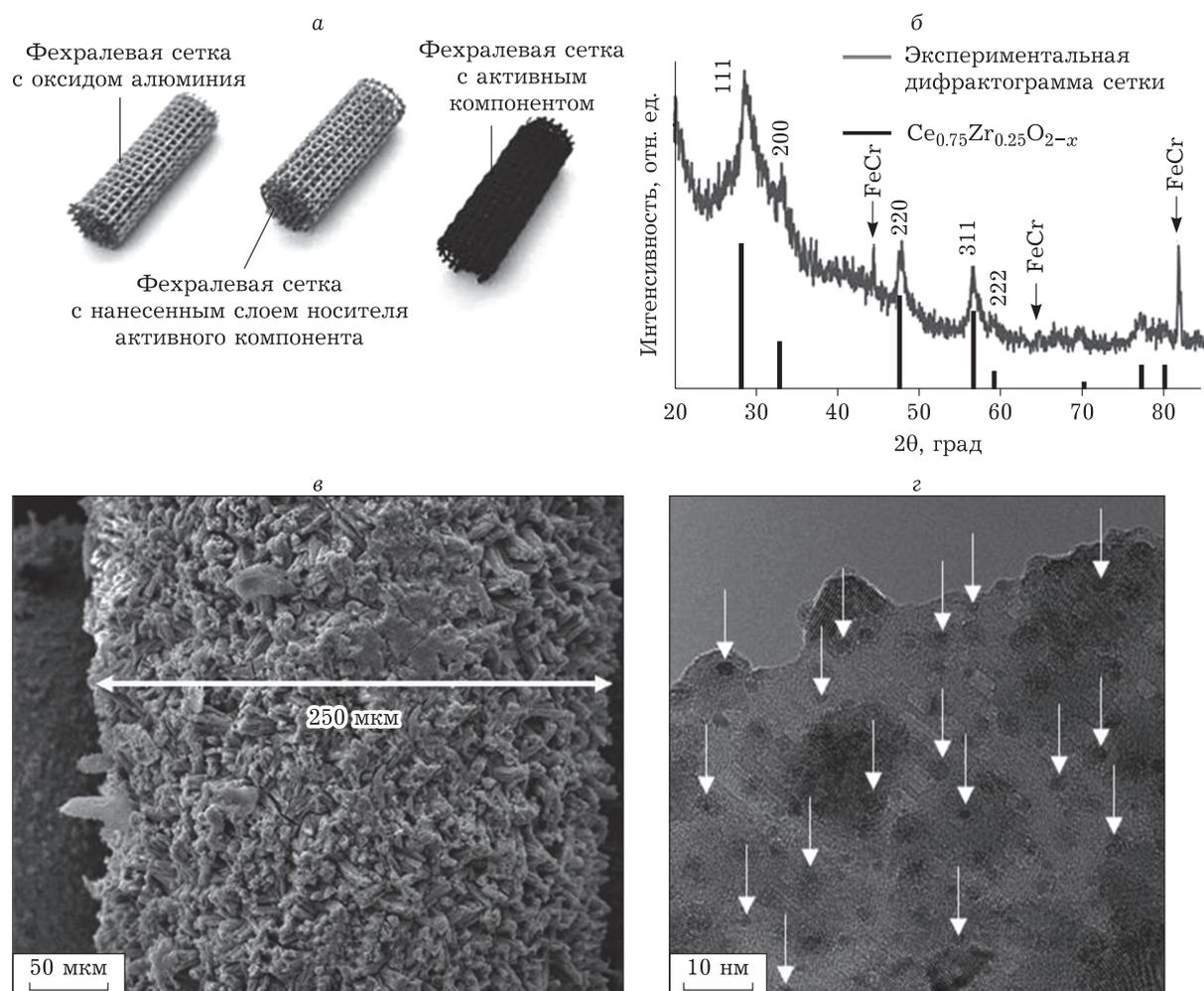


Рис. 2. Данные физико-химических методов исследования катализаторов: фотография структурированных катализаторов на различных стадиях приготовления (а); дифрактограммы фехралевого носителя и образца с нанесенным покрытием  $\text{Ce}_{0.75}\text{Zr}_{0.25}\text{O}_{2-x}$  (б); СЭМ-изображение каталитического покрытия (в); ПЭМ-изображение частиц активного компонента катализатора  $1\%\text{Rh}/\text{Ce}_{0.75}\text{Zr}_{0.25}\text{O}_2\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{FeCrAl}$  (стрелками показаны отдельные частицы) (г).

ная поверхность структурированных катализаторов практически не зависит от типа активного компонента и составляет  $6\text{--}7\text{ м}^2/\text{г}$ .

Согласно полученным данным, каталитическое покрытие представлено твердым раствором  $\text{Ce}_{0.75}\text{Zr}_{0.25}\text{O}_2$ , нанесенным на фехралеую

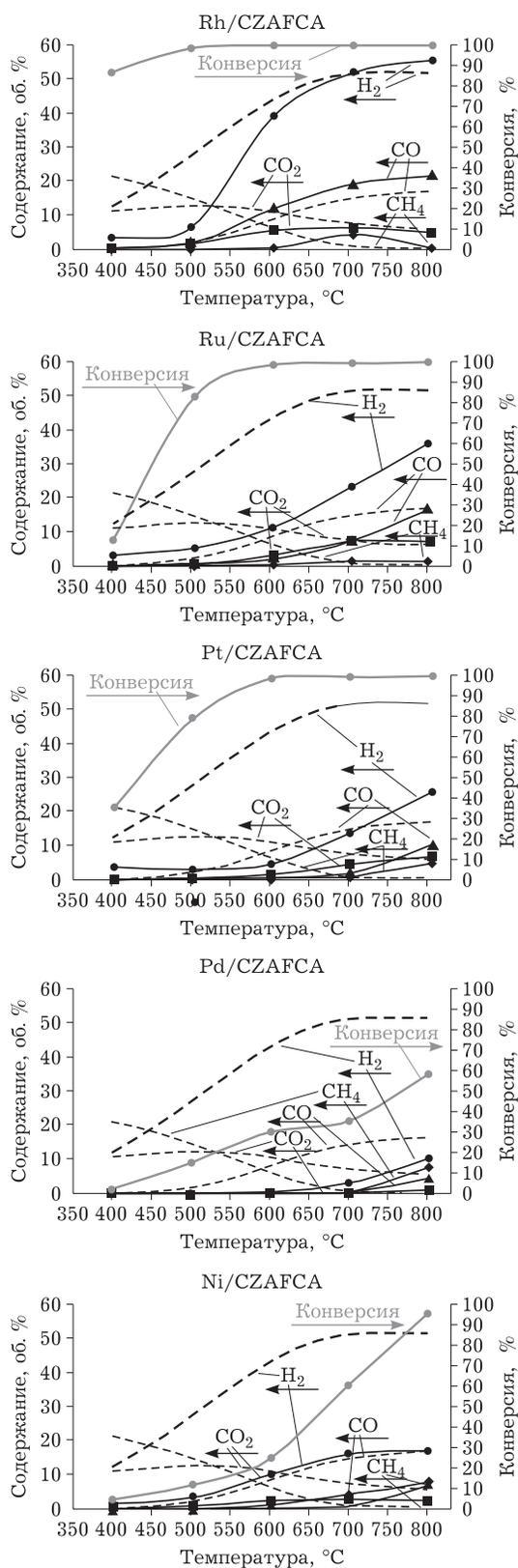


Рис. 3. Температурная зависимость паровой конверсии бутанола-1 и содержание основных продуктов реакции на различных катализаторах: 1%Rh(Ru, Pt, Pd, Ni)/CZAFA. Здесь и на рис. 4, 5: сплошные линии – экспериментальные данные, пунктирные – расчетные данные, CZAFA =  $\text{Ce}_{0.75}\text{Zr}_{0.25}\text{O}_2\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{FeCrAl}$ .

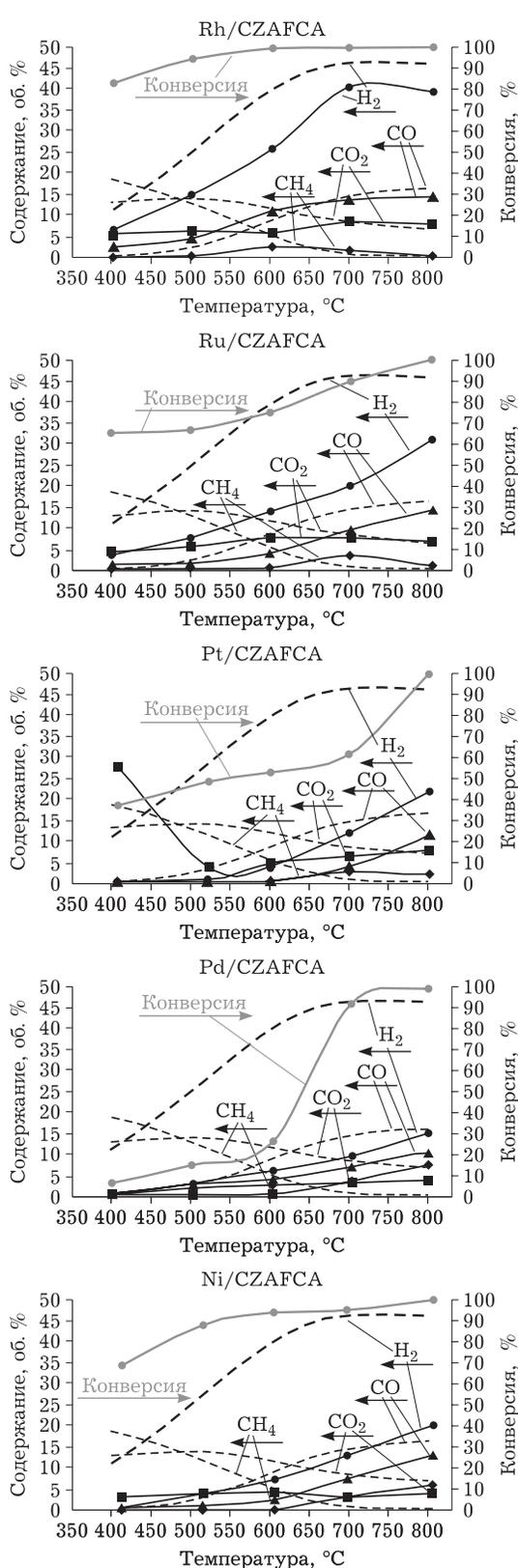


Рис. 4. Температурная зависимость автотермической конверсии бутанола-1 и содержание основных продуктов реакции на различных катализаторах: 1%Rh(Ru, Pt, Pd, Ni)/CZAFA. Обозн. см. рис. 3.

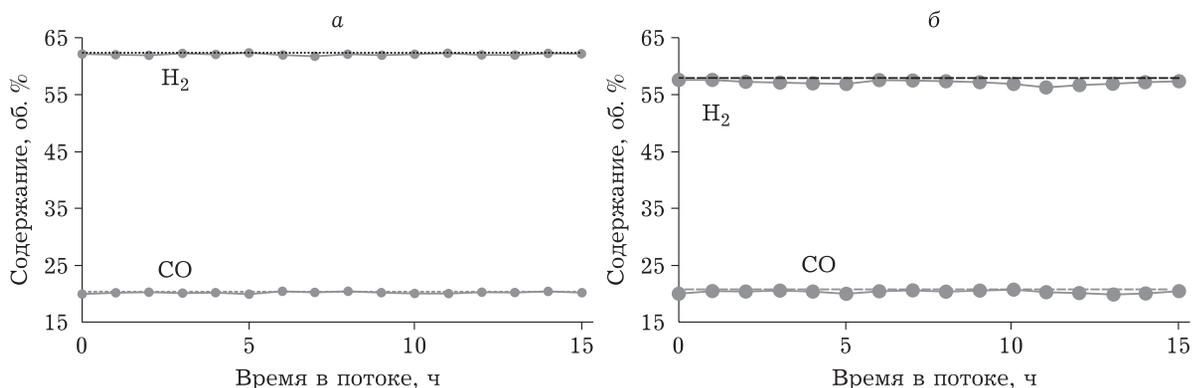


Рис. 5. Зависимость содержания H<sub>2</sub> и CO в продуктах реакции от времени на родиевом катализаторе 1%Rh/CZAFCA в процессах паровой (а) и паровоздушной (б) конверсии бутанола-1. Обозн. см. рис. 3.

сетку с промежуточным слоем оксида алюминия. Оксидные частицы слоя каталитического покрытия однородной игольчатой формы закреплены на поверхности фехральной сетки. Частицы активного компонента (Rh) размером 1–1.5 нм равномерно распределены по поверхности носителя.

Сравнение результатов исследования процессов паровой (рис. 3) и паровоздушной (рис. 4) конверсии бутанола-1 позволяет расположить катализаторы в следующие ряды изменения активности от наиболее активного катализатора к менее активным:

Rh > Ru ≈ Pt > Ni > Pd – паровая конверсия;

Rh > Ni > Ru > Pt > Pd – автотермическая конверсия.

В процессе паровой конверсии наибольшую активность показал родиевый катализатор. Достаточно высокую активность проявили рутениевый и платиновый катализаторы. Эти металлы могут выступать в качестве модифицирующего элемента для родиевого катализатора (в составе биметаллических или триметаллических катализаторов) для снижения себестоимости катализатора без ухудшения его активности. Установлено, что никелевый катализатор обладает низкой активностью в реакции парового риформинга бутанола-1 и достаточно быстро зауглероживается.

В процессе паровоздушной конверсии родиевый катализатор демонстрирует активность, схожую с паровой конверсией. В данном процессе достаточно высокую начальную активность показал никелевый катализатор, однако после окончания экспериментов на никелевом образце методом ТПО было обнаружено большое количество сажи, которая способствует быстрой дезактивации каталитических систем.

Таким образом, согласно полученным экспериментальным данным, наиболее активным катализатором в процессах паровой и паровоздушной конверсии бутанола-1 является родиевый катализатор. Для оценки стабильности данный катализатор был испытан в обеих реакциях в течение 15 ч при 800 °С и объемной газовой скорости (GHSV) 10 000 ч<sup>-1</sup> (рис. 5). По результатам проведенных ресурсных испытаний, родиевый катализатор показал стабильную работу и значения концентраций CO и H<sub>2</sub> в продуктах реакций, близкие к равновесным значениям. Признаков зауглероживания катализаторов не было обнаружено.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен синтез структурированных катализаторов с различным составом активного компонента (Pt, Rh, Pd, Ru, Ni) на фехральных сетках, скрученных в виде блоков с послойно закрепленными покрытиями на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Ce-Zr-оксида. Приготовленные катализаторы испытаны в реакциях паровой и автотермической конверсии *n*-бутанола в синтез-газ. Наибольшую активность в указанных реакциях проявил родиевый структурированный катализатор. Этот катализатор может быть рекомендован для использования в риформерах паровой и паровоздушной конверсии бутанола-1 с целью получения синтез-газа. Лабораторные ресурсные испытания в течение 15 ч показали устойчивость катализатора к образованию сажи в условиях обеих реакций. Состав продуктов реакции был близок к термодинамически равновесному. В отличие от родиевого катализатора никелевый образец подвержен быстрому зауглероживанию в

реакционных условиях, что является основной причиной его быстрой дезактивации.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Cai W., de la Piscina P. R., Homs N. Hydrogen production from the steam reforming of bio-butanol over novel supported Co-based bimetallic catalysts // *Bioresour. Technol.* 2012. Vol. 107. P. 482–486.
2. Cai W., de la Piscina P. R., Gabrowska K., Homs N. Hydrogen production from oxidative steam reforming of bio-butanol over CoIr-based catalysts: effect of the support // *Bioresour. Technol.* 2013. Vol. 128. P. 467–471.
3. Cai W., de la Piscina P. R., Homs N. Oxidative steam reforming of bio-butanol for hydrogen production: effects of noble metals on bimetallic CoM/ZnO catalysts (M = Ru, Rh, Ir, Pd) // *Appl. Catal., B.* 2014. Vol. 145. P. 56–62.
4. Harju H., Lehtonen J., Lefferts L. Steam- and autothermal-reforming of *n*-butanol over Rh/ZrO<sub>2</sub> catalyst // *Catal. Today.* 2015. Vol. 244. P. 47–57.
5. Harju H., Lehtonen J., Lefferts L. Steam reforming of *n*-butanol over Rh/ZrO<sub>2</sub> catalyst: role of 1-butene and butyraldehyde // *Appl. Catal., B.* 2016. Vol. 182. P. 33–46.
6. Hartley U. W., Amornraksa S., Kim-Lohsoontorn P., Laosiripojana N. Thermodynamic analysis and experimental study of hydrogen production from oxidative reforming of *n*-butanol // *Chem. Eng. J.* 2015. Vol. 278. P. 2–12.
7. Medrano J. A., Oliva M., Ruiz J., García L., Arauzo J. Catalytic steam reforming of butanol in a fluidized bed and comparison with other oxygenated compounds // *Fuel Process. Technol.* 2014. Vol. 124. P. 123–133.
8. Roy B., Sullivan H., Leclerc C. A. Effect of variable conditions on steam reforming and aqueous phase reforming of *n*-butanol over Ni/CeO<sub>2</sub> and Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts // *J. Power Sources.* 2014. Vol. 267. P. 280–287.
9. Varkolu M., Kunamalla A., Jinnala S. A. K., Kumar P., Maitty S. K., Shee D. Role of CeO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> mole ratio and nickel loading for steam reforming of *n*-butanol using Ni–CeO<sub>2</sub>–ZrO<sub>2</sub>–SiO<sub>2</sub> composite catalysts: a reaction mechanism // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2021. Vol. 46, No. 10. P. 7320–7335.
10. Yadav A. K., Vaidya P. D. Kinetic investigation on butanol steam reforming over Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2017. Vol. 42, No. 40. P. 25203–25212.
11. Рогожников В. Н. Разработка способа формирования слоя Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на структурированном металлическом носителе для каталитических применений: дис. ... канд. хим. наук. Новосибирск, 2017. 151 с.
12. Пат. RU 2653360 C1, 2018.

Поступила в редакцию 09.04.2024

Одобрена после рецензирования 24.04.24

Принята к публикации 25.04.2024