

Научная статья  
УДК 669.017:519.7:543.423.1  
doi: 10.17223/24135542/38/11

## Ag-содержащие катализаторы окисления CO на основе CeO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@SBA-15

Наталья Николаевна Михеева<sup>1</sup>,  
Григорий Владимирович Мамонтов<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>1</sup> natlity93@yandex.ru

<sup>2</sup> grigoriy.mamontov@mail.ru

**Аннотация.** Получена серия Ag-содержащих катализаторов окисления CO на основе композитов CeO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@SBA-15, синтезированных инкапсулированием солей в гибридный материал Pluronic-P123@SBA-15. Показано влияние блоксополимера полиэтиленгликоля и полипропиленгликоля Pluronic-P123 внутри структуры SBA-15 (упорядоченный мезопористый диоксид кремния) на характер распределения и дисперсность нанесенных компонентов CeO<sub>2</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Нанесение оксидов церия и железа на Pluronic@SBA-15 позволяет стабилизировать CeO<sub>2</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в виде высокодисперсных частиц, равномерно распределенных на поверхности носителя. Показано, что использование CeO<sub>2</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, стабилизированных в структуре SBA-15, позволяет повысить активность Ag-содержащих катализаторов в реакции окисления CO по сравнению с катализатором Ag/SBA-15.

**Ключевые слова:** Ag-содержащие катализаторы, SBA-15, CeO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, окисление CO, Pluronic-P123@SBA-15

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-73-10152.

**Для цитирования:** Михеева Н.Н., Мамонтов Г.В. Ag-содержащие катализаторы окисления CO на основе CeO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@SBA-15 // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2025. № 38. С. 132–142. doi: 10.17223/24135542/38/11

Original article  
doi: 10.17223/24135542/38/11

## Ag-containing catalysts for CO oxidation based on CeO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@SBA-15

Natalia N. Mikheeva<sup>1</sup>, Grigory V. Mamontov<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

<sup>1</sup> natlity93@yandex.ru

<sup>2</sup> grigoriy.mamontov@mail.ru

**Abstract.** A series of Ag-containing catalysts for CO oxidation based on CeO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@SBA-15 composites synthesized by salt encapsulation in the hybrid material

Pluronic-P123@SBA-15 has been obtained. The effect of a block copolymer of polyethylene glycol and polypropylene glycol Pluronic-P123 inside the SBA-15 structure (ordered mesoporous silicon dioxide) on the distribution and dispersion of the deposited CeO<sub>2</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> components is shown. The deposition of cerium and iron oxides on Pluronic@SBA-15 makes it possible to stabilize CeO<sub>2</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the form of highly dispersed particles evenly distributed on the surface of the carrier. It has been shown that the use of CeO<sub>2</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stabilized in the SBA-15 structure makes it possible to increase the activity of Ag-containing catalysts in the CO oxidation reaction compared with the Ag/SBA-15 catalyst.

**Keywords:** Ag-containing catalysts, SBA-15, CeO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CO oxidation, Pluronic-P123@SBA-15

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Science Foundation, Grant № 23-73-10152.

**For citation:** Mikheeva, N.N., Mamontov, G.V. Ag-containing catalysts for CO oxidation based on CeO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@SBA-15. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2025, 38, 132–142. doi: 10.17223/24135542/38/11

## **Введение**

Рост и развитие промышленности неминуемо приводят к росту уровня загрязненности воздуха [1, 2]. Промышленные процессы, авиа- и наземный транспорт являются источниками выбросов в воздух монооксида углерода (CO, угарный газ), летучих органических соединений, дисперсной летучей сажи и т.д. [2, 3]. Будучи токсичным соединением, монооксид углерода негативно оказывается на состоянии окружающей среды [1]. Таким образом, снижение выбросов CO в воздух является актуальной проблемой. Одним из хорошо известных способов удаления CO является его каталитическое окисление с использованием гетерогенных катализаторов, в том числе Ag-содержащих катализаторов Ag/SiO<sub>2</sub> [4–6] как более доступных аналогов дорогостоящим катализаторам на основе металлов платиновой группы.

Активность нанесенного катализатора зависит от многих факторов, среди которых структура носителя, характер взаимодействия между активным компонентом и носителем, а также дисперсность активных компонентов. Как было показано ранее [7, 8], хороших результатов в реакции окисления CO можно добиться, используя в качестве носителя для Ag-содержащих катализаторов мезопористый диоксид кремния с упорядоченной структурой SBA-15 с нанесенным на его поверхность оксидом переходного металла. Наноструктурированный оксид кремния SBA-15 представляет практический и теоретический интерес в качестве носителя за счет пористой структуры с цилиндрическими порами диаметром 6–8 нм, которые могут быть использованы в качестве нанореакторов для стабилизации активных компонентов в высокодисперсном состоянии [9]. Кроме того, ранее было показано [10], что нанесение активных компонентов на полупродукт синтеза SBA-15, содержащий в пористом пространстве темплат Pluronic P123, позволяет повысить дисперсность активных компонентов. Использование оксидов переходных

металлов, таких как  $\text{CeO}_2$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , позволит улучшить взаимодействие метал–носитель, что, в свою очередь, положительно скажется на катализических свойствах полученных систем.

Таким образом, целью настоящей работы стала разработка Ag-содержащих катализаторов окисления CO на основе  $\text{CeO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3@\text{SBA-15}$  со стабилизованными в высокодисперсном состоянии активными компонентами.

### **Экспериментальная часть**

SBA-15 был синтезирован темплатным методом синтеза, описанным в [10, 11], с использованием триблоксополимера Pluronic P123 в качестве темплата. Раствор триблоксополимера, соляной кислоты и тетраэтиксилана перемешивали при комнатной температуре в течение суток, затем автоклавировали при 100°C в течение 48 ч. Полученный образец отфильтровывали и просушивали при температуре 120°C. В результате был получен промежуточный продукт синтеза SBA-15, содержащий в пористом пространстве триблоксополимер (Pluronic@SBA-15). На полученный гибридный материал были нанесены оксиды церия и железа (8 мас. %) методом пропитки по влагоемкости с использованием водных растворов  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$  и  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ . Затем образцы прокаливали 6 ч при 500°C для выгорания органического темплата из структуры и разложения предшественников оксидов. В результате было получено четыре носителя: SBA-15,  $\text{CeO}_2@\text{SBA-15}$ ,  $\text{Ce}_1\text{Fe}_3@\text{SBA-15}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3@\text{SBA-15}$ .

На основе полученных носителей методом восстановительной пропитки были синтезированы Ag-содержащие катализаторы. Для этого носители восстанавливали в токе 10 об. %  $\text{H}_2/\text{Ar}$  при температуре 110°C, а затем методом пропитки по влагоемкости с использованием водного раствора  $\text{AgNO}_3$  наносили серебро (2 мас. %). Полученные катализаторы сушили при температуре 65°C 16 ч и прокаливали при температуре 350°C 3 ч.

Удельная поверхность, пористость и распределение пор по размерам полученных систем были исследованы методом низкотемпературной адсорбции азота на анализаторе 3Flex (Micromeritics, США). Образцы были предварительно дегазированы в вакууме (200 или 80°C, 2 ч). Площадь поверхности и распределение пор по размерам были рассчитаны с использованием методов BET и BJH-Desorption соответственно. Вклад микропор в структуре образцов оценивали с использованием метода t-plot.

Фазовый состав полученных образцов исследовали методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре XRD-7000 (Shimadzu, Япония) в диапазоне значений углов  $2\theta$  10–80° с использованием излучения  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 0,154$  нм).

Особенности восстановления активных компонентов в синтезированных образцах исследовали методом температурно-программируемого восстановления водородом (TPB- $\text{H}_2$ ) на хемосорбционном анализаторе Autochem 2950 (Micromeritics, США). Диапазон температур составлял от –20 до 900°C. Использовалась смесь с содержанием 10 об. %  $\text{H}_2/\text{Ar}$ . Для улавливания паров воды в газовой смеси использовалась ловушка со смесью изопропанола и

жидкого азота при температуре  $-86^{\circ}\text{C}$ . Скорость нагрева и расход газа составляли  $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  и  $20 \text{ мл}/\text{мин}$  соответственно. Предварительную обработку воздухом ( $20 \text{ мл}/\text{мин}$ ) проводили при температуре  $500^{\circ}\text{C}$  для образцов, не содержащих серебро, и  $200^{\circ}\text{C}$  для Ag-содержащих катализаторов с временем выдержки 20 мин.

Активность полученных катализаторов была исследована в реакции окисления CO. Эксперименты проводили в проточном кварцевом трубчатом U-образном реакторе в стационарном слое катализатора на анализаторе хемосорбции ChemiSorb 2750 (Micromeritics, USA), сопряженном с квадрупольным газовым массспектрометром UGA-300 (Stanford Research Systems, USA) для анализа конверсии CO и O<sub>2</sub> и выхода CO<sub>2</sub>. Реакционную смесь состава  $1\%\text{CO}/5\%\text{O}_2$  в гелии пропускали через слой катализатора (100 мг) со скоростью  $30 \text{ мл}/\text{мин}$  при скорости нагрева  $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ , нагрев осуществлялся в диапазоне температур от  $-20$  до  $500^{\circ}\text{C}$ . Перед экспериментом образцы подвергались предокислению в потоке воздуха при  $500^{\circ}\text{C}$  для образцов, не содержащих серебро, и  $200^{\circ}\text{C}$  для Ag-содержащих катализаторов в течение 20 мин.

## **Результаты и обсуждение**

Текстурные характеристики полученных образцов были исследованы методом низкотемпературной адсорбции азота. Как видно из рис. 1, *a*, полученные образцы характеризуются изотермой адсорбции–десорбции азота с петлей гистерезиса типа H1, характерного для материалов с упорядоченной структурой, в частности для оксида кремния типа SBA-15 [12]. Полученный SBA-15 характеризуется узким распределением пор по размерам в области  $5\text{--}7 \text{ нм}$  (рис. 1, *b*), удельной поверхностью  $702 \text{ м}^2/\text{г}$  и объемом пор  $0,844 \text{ см}^3/\text{г}$  (табл. 1). Нанесение оксидов церия и железа приводит к незначительному изменению изотермы адсорбции–десорбции, а также небольшому уменьшению значений удельной поверхности и объема пор. Это свидетельствует о равномерном распределении оксидов внутри пористой структуры SBA-15. Стоит отметить, что наиболее значительные изменения наблюдаются при нанесении только оксида церия, что может свидетельствовать о его формировании в виде более крупных частиц, чем в случае с образцами Ce<sub>1</sub>Fe<sub>3</sub>@SBA-15 и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@SBA-15. Небольшой сдвиг распределения пор по размерам для модифицированных образцов в область больших размеров и соответствующее увеличение величины среднего размера пор с  $5,62$  до  $5,68\text{--}5,72 \text{ нм}$  может являться следствием меньшей усадки аморфной структуры диоксида кремния SBA-15 при прокалке за счет стабилизации соединениями церия и железа. При нанесении серебра также происходят незначительное изменение изотермы адсорбции–десорбции и уменьшение значений удельной поверхности и объема пор, что свидетельствует о равномерном распределении серебра внутри пористой структуры SBA-15. Незначительно снижается и вклад микропор (удельная поверхность микропор  $S_{\text{micro}}$  и объем микропор  $V_{\text{micro}}$ , см. табл. 1), что указывает, что часть серебра локализуется в микропорах образца или блокирует их.

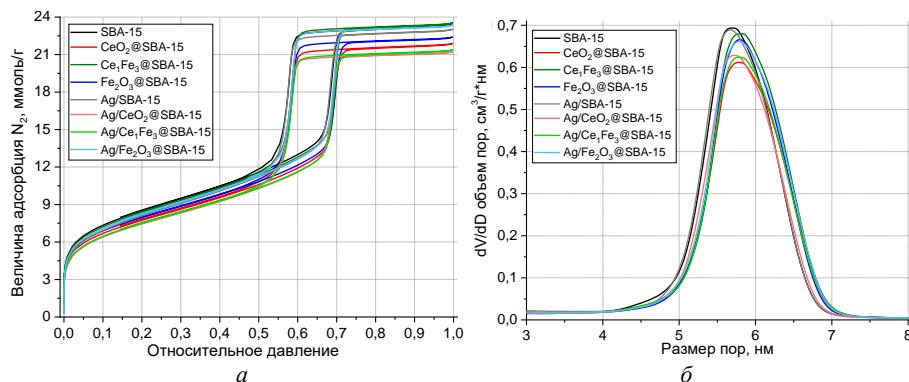


Рис. 1. Изотермы адсорбции–десорбции азота (а) и соответствующие распределения пор по размерам (б) для полученных образцов

Таблица 1

**Текстурные характеристики полученных образцов**

Образцы	$S_{\text{БВТ}}$ , м <sup>2</sup> /г	$V_{\text{пор}}$ , см <sup>3</sup> /г	$D$ , нм	$S_{\text{micro}}$ , м <sup>2</sup> /г	$V_{\text{micro}}$ , см <sup>3</sup> /г
SBA-15	702	0,844	5,62	143	0,049
CeO <sub>2</sub> @SBA-15	623	0,772	5,70	121	0,043
Ce <sub>1</sub> Fe <sub>3</sub> @SBA-15	672	0,830	5,72	134	0,048
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> @SBA-15	641	0,789	5,71	133	0,048
Ag/SBA-15	657	0,825	5,59	104	0,033
Ag/CeO <sub>2</sub> @SBA-15	602	0,759	5,64	101	0,034
Ag/Ce <sub>1</sub> Fe <sub>3</sub> @SBA-15	607	0,763	5,68	106	0,036
Ag/Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> @SBA-15	664	0,829	5,71	120	0,041

На рис. 2 представлены рентгенограммы полученных образцов. Образцы характеризуются наличием широкого гало в области 15–35°, характерным для аморфного оксида кремния, и отсутствием ярко выраженных рефлексов, что указывает на стабилизацию активных компонентов в виде высокодисперсных частиц (менее 3 нм). Стоит отметить, что образцы CeO<sub>2</sub>@SBA-15 и Ag/CeO<sub>2</sub>@SBA-15 характеризуются наличием слабоинтенсивных рефлексов на 28,6, 47,2 и 56,3°, характерных для оксида церия. Приблизительное значение ОКР для кристаллитов CeO<sub>2</sub> в этих образцах составляет 2,8 нм.

Восстановительная способность полученных образцов была исследована методом ТПВ-Н<sub>2</sub>. Как видно из профилей ТПВ-Н<sub>2</sub> (рис. 3), образец CeO<sub>2</sub>@SBA-15 характеризуется пиком поглощения водорода в области 350–650°C. Для образцов схожего состава характерно наличие двойного пика поглощения водорода [13–15], сочетающего в себе поглощение водорода поверхностью (при температуре 300–700°C) и объемом (при температуре 650–900°C) частиц оксида церия. Однако в данном случае можно наблюдать одинарный пик поглощения водорода, что свидетельствует о распределении частиц оксида церия в высокодисперсном состоянии, т.е. практически весь оксид церия является поверхностным и легко восстанавливается.

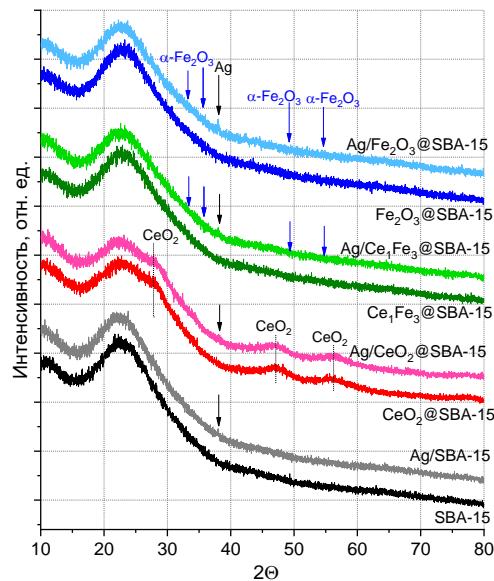


Рис. 2. Рентгенограммы полученных образцов

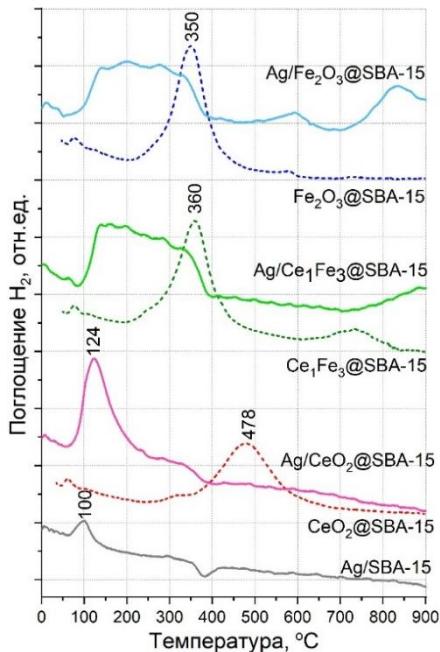


Рис. 3. Профили ТПВ-Н<sub>2</sub> для полученных образцов

Образец Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@SBA-15 характеризуется наличием пика поглощения водорода в температурном диапазоне 250–500°C, что может быть связано с восстановлением Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> или сразу до FeO за счет высокодисперсного

состояния [16–18]. Образец  $\text{Ce}_1\text{Fe}_3@\text{SBA}-15$  характеризуется наличием двух пиков поглощения водорода при 250–450°C и низкоинтенсивным пиком поглощения водорода при температурах 650–800°C. Низкотемпературный пик поглощения водорода, предположительно, связан с совместным восстановлением оксидов церия и железа (III); поскольку восстановление происходит при более низких температурах, чем в случае образца  $\text{CeO}_2@\text{SBA}-15$ , можно говорить о взаимодействии оксидов церия и железа на поверхности SBA-15. Более высокотемпературный пик поглощения водорода может быть связан с восстановлением  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , прочно связанного с поверхностью SBA-15 за счет связи  $\text{Fe}-\text{O}-\text{Si}$  до Fe или  $\text{Fe}^{2+}$  с образованием  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  и, предположительно, катализируемого оксидом церия [16–19].

Катализатор  $\text{Ag}/\text{SBA}-15$  характеризуется слабоинтенсивным пиком поглощения водорода в области 50–150°C с максимумом при температуре 100°C, связанным с восстановлением дисперсных  $\text{AgOx}$  форм. Количество поглощенного водорода составляет 18 мкмоль/г (табл. 2). Добавление серебра к полученным Ce- и Fe-содержащим образцам приводит к смещению пиков восстановления в низкотемпературную область, а также к увеличению количества поглощенного водорода (см. табл. 2). Совместное восстановление окисленных форм серебра и нанесенных оксидов свидетельствует о взаимодействии серебра с оксидами церия и железа.

Таблица 2

**Количество поглощенного в ТПВ-Н<sub>2</sub> водорода для полученных образцов**

Образцы	Поглощение Н <sub>2</sub> , мкмоль/г
$\text{CeO}_2@\text{SBA}-15$	144
$\text{Ce}_1\text{Fe}_3@\text{SBA}-15$	154
$\text{Fe}_2\text{O}_3@\text{SBA}-15$	183
$\text{Ag}/\text{SBA}-15$	18
$\text{Ag}/\text{CeO}_2@\text{SBA}-15$	209
$\text{Ag}/\text{Ce}_1\text{Fe}_3@\text{SBA}-15$	272
$\text{Ag}/\text{Fe}_2\text{O}_3@\text{SBA}-15$	267

Каталитические свойства полученных систем были исследованы в реакции окисления CO (рис. 4, табл. 3). Как видно из рис. 4, образец  $\text{Fe}_2\text{O}_3@\text{SBA}-15$  характеризуется низкой каталитической активностью: окисление CO на этом образце начинается при температуре выше 400°C, а 50 и 100%-ная конверсия в выбранном температурном интервале не достигается. Для образцов  $\text{CeO}_2@\text{SBA}-15$  и  $\text{Ce}_1\text{Fe}_3@\text{SBA}-15$  характерно начало реакции окисления CO при температуре выше 320 и 280°C соответственно. Полная конверсия CO для этих образцов достигается при 450–500°C.

При нанесении серебра наблюдается значительное улучшение каталитических свойств. Для всех Ag-содержащих образцов характерно начало реакции при температуре ниже 100°C и достижение 100%-ной конверсии при температуре ниже 300°C. Также для этих образцов характерно значение энергии активации реакции в интервале 36–50 кДж/моль. Наибольшую активность проявил образец  $\text{Ag}/\text{Fe}_2\text{O}_3@\text{SBA}-15$ , при использовании которого

50 и 98%-ная конверсия достигается при температурах 161 и 257°C соответственно.

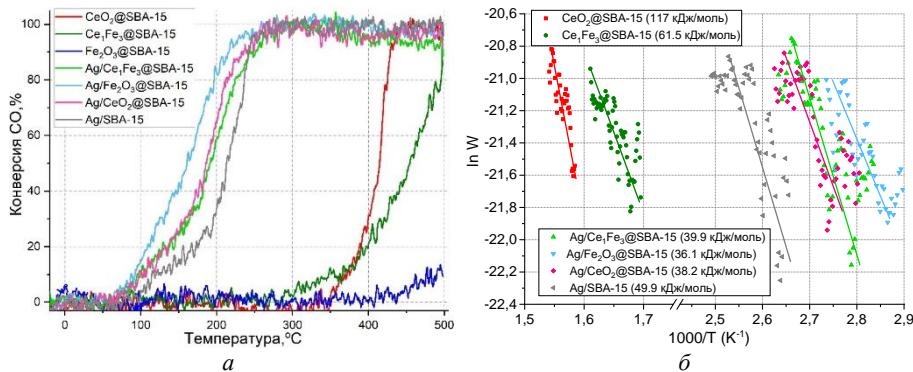


Рис. 4. Каталитические свойства полученных образцов в реакции окисления CO (а) и спрямление скорости окисления CO в координатах Аррениуса для нахождения энергии активации реакции (б)

Таблица 3

#### Каталитические свойства полученных образцов

Образец	$T_{50\%}$ , °C	$T_{98\%}$ , °C	$E_a$ , кДж/моль
CeO <sub>2</sub> @SBA-15	414	442	117
Ce <sub>1</sub> Fe <sub>3</sub> @SBA-15	454	498	61,5
Ag/SBA-15	213	264	49,9
Ag/CeO <sub>2</sub> @SBA-15	186	259	38,2
Ag/Ce <sub>1</sub> Fe <sub>3</sub> @SBA-15	191	278	39,9
Ag/Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> @SBA-15	161	257	36,1

#### Выводы

Таким образом, показано, что использование подхода по нанесению активных компонентов на полупродукт синтеза SBA-15 позволяет стабилизировать оксиды железа и церия в виде высокодисперсных частиц, равномерно распределенных в пористом пространстве SBA-15. Такое распределение оксидов достигается за счет использования гибридного материала Pluronic-P123@SBA-15, в котором блок-сополимер полизтиленгликоля и полипропиленгликоля Pluronic-P123, находящийся внутри пор SBA-15, стабилизирует предшественники оксидов и способствует образованию очень мелких частиц оксидов. Нанесение серебра на полученные системы приводит к изменению их окислительно-восстановительных свойств, в частности к смещению пиков поглощения водорода в более низкотемпературную область и увеличению количества поглощенного водорода за счет взаимодействия серебра с оксидами железа и церия. Взаимодействие серебра и оксидов приводит к значительному снижению температуры окисления CO и энергии активации реакции по сравнению с носителями без серебра и катализатором Ag/SBA-15.

**Список источников**

1. Soliman N.K. Factors affecting CO oxidation reaction over nanosized materials: A review // Journal of Materials Research and Technology. 2019. Vol. 8 (2). P. 2395–2407.
2. Lu Z. et al. Insight into the degradation mechanism of mixed VOCs oxidation over Pd/UiO-66 (Ce) catalysts: Combination of operando spectroscopy and theoretical calculation // Separation and Purification Technology. 2025. Vol. 354. Art. 129443.
3. Chen W. et al. CO oxidation over CuOx/TiO<sub>2</sub> catalyst: The importance of oxygen vacancies and Cu<sup>+</sup> species // Applied Surface Science. 2023. Vol. 618. Art. 156539.
4. Zhang X. et al. Studies of silver species for low-temperature CO oxidation on Ag/SiO<sub>2</sub> catalysts // Separation and Purification Technology. 2010. Vol. 72 (3). P. 395–400.
5. Alimunnisa J., Ravichandran K., Meena K.S. Synthesis and characterization of Ag@SiO<sub>2</sub> core-shell nanoparticles for antibacterial and environmental applications // Journal of Molecular Liquids. 2017. Vol. 231. P. 281–287.
6. Dutov V.V. et al. Low-temperature CO oxidation over Ag/SiO<sub>2</sub> catalysts: Effect of OH/Ag ratio // Applied Catalysis B: Environmental. 2018. Vol. 221. P. 598–609.
7. Mikheeva N.N., Zaikovskii V.I., Larichev Y.V., Mamontov G.V. Toluene abatement on Ag-CeO<sub>2</sub>/SBA-15 catalysts: synergistic effect of silver and ceria // Materials Today Chemistry. 2021. Vol. 21. P. 100530(1)–100530(9). doi: 10.1016/j.mtchem.2021.100530
8. Мухеева Н.Н., Мамонтов Г.В. Влияние соотношения SiOH/Ag на катализическую активность Ag/SBA-15 катализаторов в реакции окисления СО // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2021. № 22. С. 6–16. doi: 10.17223/24135542/22/1
9. Verma P. et al. Functionalized mesoporous SBA-15 silica: recent trends and catalytic applications // Nanoscale. 2020. Vol. 12 (21). P. 11333–11363.
10. Taratayko A., Mikheeva N., Mamontov G., Larichev Yu. et al. Ag-CeO<sub>2</sub>/SBA-15 composite prepared from Pluronic P123@SBA-15 hybrid as catalyst for room-temperature reduction of 4-nitrophenol // Catalysis Today. 2021. Vol. 375. P. 576–584. doi: 10.1016/j.cattod.2020.05.001
11. Zhao D. et al. Nonionic triblock and star diblock copolymer and oligomeric surfactant syntheses of highly ordered, hydrothermally stable, mesoporous silica structures // Journal of the American Chemical Society. 1998. Vol. 120 (24). P. 6024–6036.
12. Thommes M. et al. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) // Pure and Applied Chemistry. 2015. Vol. 87 (9–10). P. 1051–1069.
13. Mikheeva N.N., Zaikovskii V.I., Mamontov G.V. Synthesis of ceria nanoparticles in pores of SBA-15: Pore size effect and influence of citric acid addition // Microporous and Mesoporous Materials. 2019. Vol. 277. P. 10–16.
14. Yao H.C., Yao Y.F.Y. Ceria in automotive exhaust catalysts: I. Oxygen storage // Journal of Catalysis. 1984. Vol. 86 (2). P. 254–265.
15. Zhu H. et al. Pd/CeO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub> catalyst for CO oxidation at low temperature: a TPR study with H<sub>2</sub> and CO as reducing agents // Journal of Catalysis. 2004. Vol. 225 (2). P. 267–277.
16. Liang M., Kang W., Xie K. Comparison of reduction behavior of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO and ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> by TPR technique // Journal of Natural Gas Chemistry. 2009. Vol. 18 (1). P. 110–113.
17. Li K. et al. Modification of CeO<sub>2</sub> on the redox property of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // Materials Letters. 2013. Vol. 93. P. 129–132.
18. Nadar A. et al. Nanostructured Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dispersed on SiO<sub>2</sub> as catalyst for high temperature sulfuric acid decomposition – Structural and morphological modifications on catalytic use and relevance of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> interactions // Applied Catalysis B: Environmental. 2017. Vol. 217. P. 154–168.
19. Promtongkaew A. et al. Controlling the Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> interaction: The effect on the H<sub>2</sub>S selective catalytic oxidation and catalyst deactivation // Environmental Research. 2022. Vol. 215. Art. 114354.

## References

1. Soliman N.K. Factors affecting CO oxidation reaction over nanosized materials: A review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8 (2). P. 2395–2407.
2. Lu Z. et al. Insight into the degradation mechanism of mixed VOCs oxidation over Pd/UiO-66 (Ce) catalysts: Combination of operando spectroscopy and theoretical calculation. *Separation and Purification Technology*. 2025. Vol. 354. Art. 129443.
3. Chen W. et al. CO oxidation over CuOx/TiO<sub>2</sub> catalyst: The importance of oxygen vacancies and Cu<sup>+</sup> species. *Applied Surface Science*. 2023. Vol. 618. Art. 156539.
4. Zhang X. et al. Studies of silver species for low-temperature CO oxidation on Ag/SiO<sub>2</sub> catalysts. *Separation and Purification Technology*. 2010. Vol. 72 (3). P. 395–400.
5. Alimunnisa J., Ravichandran K., Meena K.S. Synthesis and characterization of Ag@SiO<sub>2</sub> core-shell nanoparticles for antibacterial and environmental applications. *Journal of Molecular Liquids*. 2017. Vol. 231. P. 281–287.
6. Dutov V.V. et al. Low-temperature CO oxidation over Ag/SiO<sub>2</sub> catalysts: Effect of OH/Ag ratio. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2018. Vol. 221. P. 598–609.
7. Mikheeva N.N., Zaikovskii V.I., Larichev Y.V., Mamontov G.V. Toluene abatement on Ag-CeO<sub>2</sub>/SBA-15 catalysts: synergistic effect of silver and ceria. *Materials Today Chemistry*. 2021. Vol. 21. P. 100530(1)–100530(9). doi: 10.1016/j.mtchem.2021.100530
8. Mixeeva N.N., Mamontov G.V. Vliyanie sootnosheniya SiOH/Ag na kataliticheskuyu aktivnost' Ag/SBA-15 katalizatorov v reakcii okisleniya SO [The influence of the SiOH/Ag ratio on the catalytic activity of Ag/SBA-15 catalysts in the CO oxidation] // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ximiya. 2021. № 22. P. 6–16. doi: 10.17223/24135542/22/1
9. Verma P. et al. Functionalized mesoporous SBA-15 silica: recent trends and catalytic applications. *Nanoscale*. 2020. Vol. 12 (21). P. 11333–11363.
10. Taratayko A., Mikheeva N., Mamontov G., Larichev Yu. et al. Ag-CeO<sub>2</sub>/SBA-15 composite prepared from Pluronic P123@SBA-15 hybrid as catalyst for room-temperature reduction of 4-nitrophenol. *Catalysis Today*. 2021. Vol. 375. P. 576–584. doi: 10.1016/j.cattod.2020.05.001
11. Zhao D. et al. Nonionic triblock and star diblock copolymer and oligomeric surfactant syntheses of highly ordered, hydrothermally stable, mesoporous silica structures. *Journal of the American Chemical Society*. 1998. Vol. 120 (24). P. 6024–6036.
12. Thommes M. et al. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*. 2015. Vol. 87 (9–10). P. 1051–1069.
13. Mikheeva N.N., Zaikovskii V.I., Mamontov G.V. Synthesis of ceria nanoparticles in pores of SBA-15: Pore size effect and influence of citric acid addition. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2019. Vol. 277. P. 10–16.
14. Yao H.C., Yao Y.F.Y. Ceria in automotive exhaust catalysts: I. Oxygen storage. *Journal of Catalysis*. 1984. Vol. 86 (2). P. 254–265.
15. Zhu H. et al. Pd/CeO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub> catalyst for CO oxidation at low temperature: a TPR study with H<sub>2</sub> and CO as reducing agents. *Journal of Catalysis*. 2004. Vol. 225 (2). P. 267–277.
16. Liang M., Kang W., Xie K. Comparison of reduction behavior of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO and ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> by TPR technique. *Journal of Natural Gas Chemistry*. 2009. Vol. 18 (1). P. 110–113.
17. Li K. et al. Modification of CeO<sub>2</sub> on the redox property of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Materials Letters*. 2013. Vol. 93. P. 129–132.
18. Nadar A. et al. Nanostructured Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dispersed on SiO<sub>2</sub> as catalyst for high temperature sulfuric acid decomposition – Structural and morphological modifications on catalytic use and relevance of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> interactions. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2017. Vol. 217. P. 154–168.
19. Promtongkaew A. et al. Controlling the Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> interaction: The effect on the H<sub>2</sub>S selective catalytic oxidation and catalyst deactivation. *Environmental Research*. 2022. Vol. 215. Art. 114354.

***Сведения об авторах:***

**Михеева Наталья Николаевна** – младший научный сотрудник Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: natlity93@yandex.ru

**Мамонтов Григорий Владимирович** – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, доцент Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: grigoriymamontov@mail.ru

***Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.***

***Information about the authors:***

**Mikheeva Natalia N.** – Junior Researcher, Tomsk State University (Tomsk, Russia). E-mail: natlity93@yandex.ru

**Mamontov Grigory V.** – PhD in Chemistry, Senior Researcher, Associate Professor, Tomsk State University (Tomsk, Russia). E-mail: grigoriymamontov@mail.ru

***Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.***

*Статья поступила в редакцию 05.05.2025; принята к публикации 29.09.2025  
The article was submitted 05.05.2025; accepted for publication 29.09.2025*