

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

Ag-содержащие катализаторы окисления СО на основе $\text{CeO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{@SBA-15}$

**Наталья Николаевна Михеева¹,
Григорий Владимирович Мамонтов²**

^{1, 2} *Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *natlitv93@yandex.ru*

² *grigoriymamontov@mail.ru*

Аннотация. Получена серия Ag-содержащих катализаторов окисления СО на основе композитов $\text{CeO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{@SBA-15}$, 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_2 и Fe_2O_3 . Нанесение оксидов церия и железа на Pluronic@SBA-15 позволяет стабилизировать CeO_2 и Fe_2O_3 в виде высокодисперсных частиц, равномерно распределенных на поверхности носителя. Показано, что использование CeO_2 и Fe_2O_3 , стабилизированных в структуре SBA-15, позволяет повысить активность Ag-содержащих катализаторов в реакции окисления СО по сравнению с катализатором Ag/SBA-15.

Ключевые слова: Ag-содержащие катализаторы, SBA-15, CeO_2 , Fe_2O_3 , окисление СО, 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 СО на основе $\text{CeO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{@SBA-15}$ // 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 $\text{CeO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{@SBA-15}$

Natalia N. Mikheeva¹, Grigory V. Mamontov²

^{1, 2} *Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *natlitv93@yandex.ru*

² *grigoriymamontov@mail.ru*

Abstract. A series of Ag-containing catalysts for CO oxidation based on $\text{CeO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{@SBA-15}$ 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 CeO₂ and Fe₂O₃ components is shown. The deposition of cerium and iron oxides on Pluronic@SBA-15 makes it possible to stabilize CeO₂ and Fe₂O₃ in the form of highly dispersed particles evenly distributed on the surface of the carrier. It has been shown that the use of CeO₂ and Fe₂O₃ 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, CeO₂, Fe₂O₃, CO oxidation, Pluronic-P123@SBA-15

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

For citation: Mikhееva, N.N., Mamontov, G.V. Ag-containing catalysts for CO oxidation based on CeO₂-Fe₂O₃@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 сказывается 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/SiO₂ [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 пораами 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 CeO_2 и Fe_2O_3 , позволит улучшить взаимодействие металл–носитель, что, в свою очередь, положительно скажется на каталитических 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 стабилизированными 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 тетраэтоксисилана перемешивали при комнатной температуре в течение суток, затем автоклавируют 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 влагеомкости 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. % H_2/Ar при температуре 110°C , а затем методом пропитки по влагеомкости с использованием водного раствора 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 2θ $10\text{--}80$ с использованием излучения $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0,154$ нм).

Особенности восстановления активных компонентов в синтезированных образцах исследовали методом температурно-программируемого восстановления водородом (ТПВ- H_2) на хемосорбционном анализаторе Autochem 2950 (Micromeritics, США). Диапазон температур составлял от -20 до 900°C . Использовалась смесь с содержанием 10 об. % H_2/Ar . Для улавливания паров воды в газовой смеси использовалась ловушка со смесью изопропанола и

жидкого азота при температуре -86°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°C для образцов, не содержащих серебро, и 200°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 масспектрометром UGA-300 (Stanford Research Systems, USA) для анализа конверсии CO и O₂ и выхода CO₂. Реакционную смесь состава 1% CO/5% O₂ 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°C . Перед экспериментом образцы подвергались предокислению в потоке воздуха при 500°C для образцов, не содержащих серебро, и 200°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, а, 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 5–7 нм (рис. 1, б), 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 Ce₁Fe₃@SBA-15 и Fe₂O₃@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 5,68–5,72 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_{micro} и объем микропор V_{micro} , см. табл. 1), что указывает, что часть серебра локализуется в микропорах образца или блокирует их.

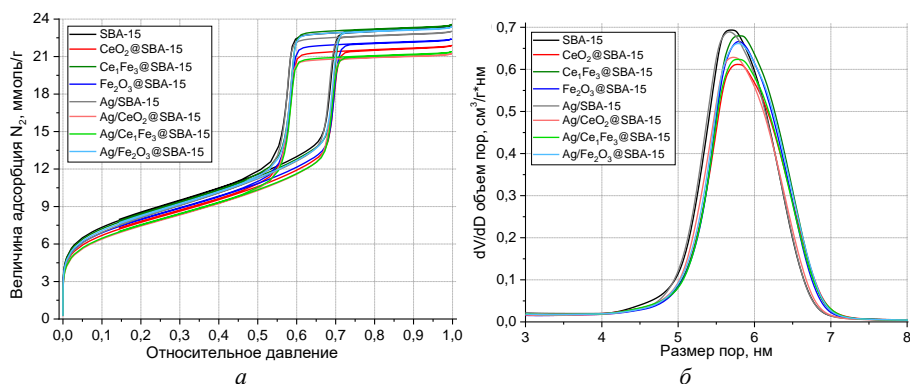


Рис. 1. Изотермы адсорбции–десорбции азота (а) и соответствующие распределения пор по размерам (б) для полученных образцов

Таблица 1

Текстуальные характеристики полученных образцов

Образцы	$S_{\text{BET}}, \text{ м}^2/\text{г}$	$V_{\text{пор}}, \text{ см}^3/\text{г}$	$D, \text{ нм}$	$S_{\text{micro}}, \text{ м}^2/\text{г}$	$V_{\text{micro}}, \text{ см}^3/\text{г}$
SBA-15	702	0,844	5,62	143	0,049
CeO ₂ @SBA-15	623	0,772	5,70	121	0,043
Ce ₁ Fe ₃ @SBA-15	672	0,830	5,72	134	0,048
Fe ₂ O ₃ @SBA-15	641	0,789	5,71	133	0,048
Ag/SBA-15	657	0,825	5,59	104	0,033
Ag/CeO ₂ @SBA-15	602	0,759	5,64	101	0,034
Ag/Ce ₁ Fe ₃ @SBA-15	607	0,763	5,68	106	0,036
Ag/Fe ₂ O ₃ @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 CeO₂@SBA-15 и Ag/CeO₂@SBA-15 характеризуются наличием слабоинтенсивных рефлексов на 28,6, 47,2 и 56,3°, характерных для оксида церия. Приблизительное значение ОКР для кристаллитов CeO₂ в этих образцах составляет 2,8 нм.

Восстановительная способность полученных образцов была исследована методом ТПВ-H₂. Как видно из профилей ТПВ-H₂ (рис. 3), образец CeO₂@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.

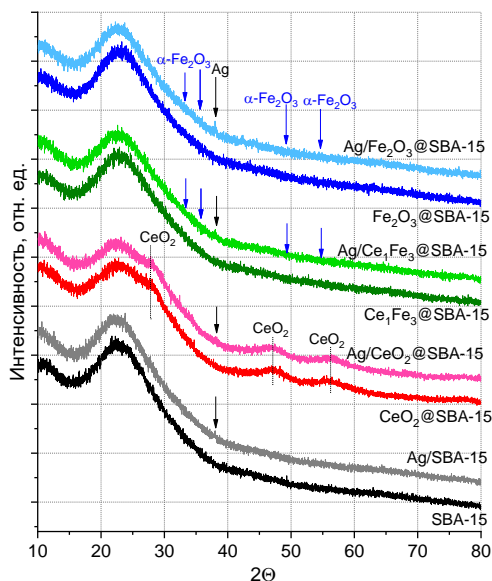


Рис. 2. Рентгенограммы полученных образцов

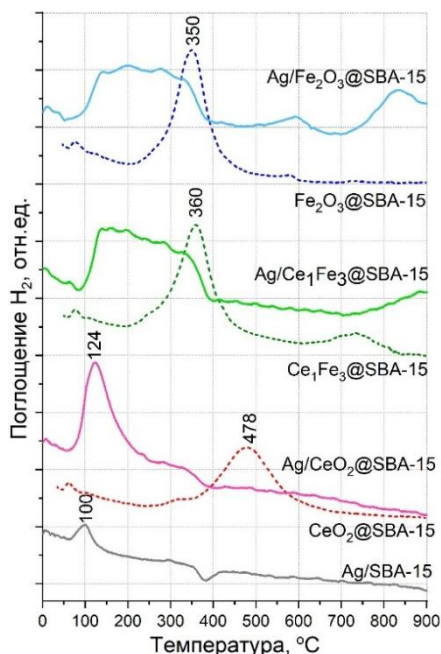


Рис. 3. Профили ТПВ-Н₂ для полученных образцов

Образец Fe₂O₃@SBA-15 характеризуется наличием пика поглощения водорода в температурном диапазоне 250–500°C, что может быть связано с восстановлением Fe₂O₃ до Fe₃O₄ 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 Fe_3O_4 , прочно связанного с поверхностью SBA-15 за счет связи Fe–O–Si до Fe или Fe^{2+} с образованием Fe_2SiO_4 и, предположительно, катализируемого оксидом церия [16–19].

Катализатор Ag/SBA-15 характеризуется слабоинтенсивным пиком поглощения водорода в области 50–150°C с максимумом при температуре 100°C, связанным с восстановлением дисперсных 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-Н₂ водорода для полученных образцов

Образцы	Поглощение H ₂ , 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
Ag/SBA-15	18
Ag/CeO ₂ @SBA-15	209
Ag/Ce ₁ Fe ₃ @SBA-15	272
Ag/Fe ₂ O ₃ @SBA-15	267

Каталитические свойства полученных систем были исследованы в реакции окисления CO (рис. 4, табл. 3). Как видно из рис. 4, образец $\text{Fe}_2\text{O}_3@\text{SBA-15}$ охарактеризуется 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 Ag/Fe₂O₃@SBA-15, при использовании которого

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

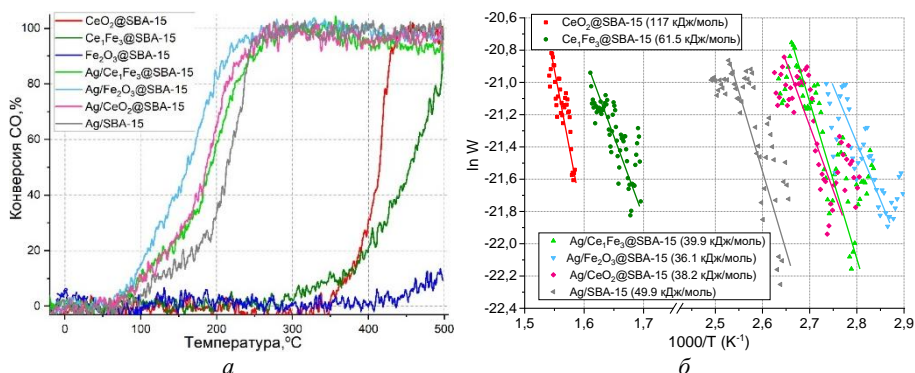


Рис. 4. Каталитические свойства полученных образцов в реакции окисления CO (а) и спрямление скорости окисления CO в координатах Аррениуса для нахождения энергии активации реакции (б)

Таблица 3

Каталитические свойства полученных образцов

Образец	$T_{50\%}$, °C	$T_{98\%}$, °C	E_a , кДж/моль
CeO ₂ @SBA-15	414	442	117
Ce ₁ Fe ₃ @SBA-15	454	498	61,5
Ag/SBA-15	213	264	49,9
Ag/CeO ₂ @SBA-15	186	259	38,2
Ag/Ce ₁ Fe ₃ @SBA-15	191	278	39,9
Ag/Fe ₂ O ₃ @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 полиэтиленгликоля 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/TiO₂ catalyst: The importance of oxygen vacancies and Cu⁺ 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/SiO₂ 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@SiO₂ 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/SiO₂ 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-CeO₂/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. Михеева Н.Н., Мамонтов Г.В. Влияние соотношения SiOH/Ag на каталитическую активность Ag/SBA-15 катализаторов в реакции окисления CO // *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-CeO₂/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/CeO₂–TiO₂ catalyst for CO oxidation at low temperature: a TPR study with H₂ 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 Fe₂O₃, ZnO and ZnFe₂O₄ by TPR technique // *Journal of Natural Gas Chemistry*. 2009. Vol. 18 (1). P. 110–113.
17. Li K. et al. Modification of CeO₂ on the redox property of Fe₂O₃ // *Materials Letters*. 2013. Vol. 93. P. 129–132.
18. Nadar A. et al. Nanostructured Fe₂O₃ dispersed on SiO₂ as catalyst for high temperature sulfuric acid decomposition – Structural and morphological modifications on catalytic use and relevance of Fe₂O₃–SiO₂ interactions // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2017. Vol. 217. P. 154–168.
19. Promtongkaew A. et al. Controlling the Fe₂O₃–SiO₂ interaction: The effect on the H₂S 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/TiO₂ catalyst: The importance of oxygen vacancies and Cu⁺ 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/SiO₂ 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@SiO₂ 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/SiO₂ 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-CeO₂/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. Khimiya. 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-CeO₂/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/CeO₂–TiO₂ catalyst for CO oxidation at low temperature: a TPR study with H₂ 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 Fe₂O₃, ZnO and ZnFe₂O₄ by TPR technique. *Journal of Natural Gas Chemistry*. 2009. Vol. 18 (1). P. 110–113.
17. Li K. et al. Modification of CeO₂ on the redox property of Fe₂O₃. *Materials Letters*. 2013. Vol. 93. P. 129–132.
18. Nadar A. et al. Nanostructured Fe₂O₃ dispersed on SiO₂ as catalyst for high temperature sulfuric acid decomposition – Structural and morphological modifications on catalytic use and relevance of Fe₂O₃-SiO₂ interactions. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2017. Vol. 217. P. 154–168.
19. Promtongkaew A. et al. Controlling the Fe₂O₃–SiO₂ interaction: The effect on the H₂S 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: natlitv93@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: natlitv93@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