

Научная статья
УДК 544.478-03
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.024

ГИДРИРОВАНИЕ CO₂ В ПРИСУТСТВИИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КАТАЛИЗАТОРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ ДВОЙНЫХ КОМПЛЕКСНЫХ СОЛЕЙ

**Алевтина Николаевна Гостева¹, Алена Андреевна Грабчак²,
Сергей Александрович Сви́дерский³, Майя Валерьевна Куликова⁴**

¹Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени
И. В. Тананаева Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия
^{2, 3, 4}Институт нефтехимического синтеза имени А. В. Топчиева Российской академии наук,
Москва, Россия

¹angosteva@list.ru

²ale.grabchak@ips.ac.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0504-5342>

³<https://orcid.org/0000-0002-1905-1946>

⁴<https://orcid.org/0000-0003-2235-8989>

Аннотация

Проведено исследование влияния метода получения катализатора на основе двойных комплексных солей железа и кобальта — термоллиза либо гидротермального синтеза — на его свойства в процессе гидрирования CO₂. Установлено, что применение гидротермального синтеза позволяет достичь более высокой конверсии CO₂ (до 51,5 %), чем в случае получения катализатора методом термоллиза (до 27 %), однако селективность катализатора, полученного термоллизом, по углеводородам C₅₊ выше, чем для аналога, полученного гидротермальным синтезом.

Ключевые слова:

гидрирование CO₂, катализ, двойные комплексные соединения, биметаллический катализатор, термоллиз, гидротермальный синтез

Благодарности:

статья выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-29-20076.

Финансирование:

грант Российского научного фонда № 24-29-20076.

Для цитирования:

Гидрирование CO₂ в присутствии биметаллических катализаторов, полученных на основе двойных комплексных солей / А. Н. Гостева [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 1. С. 130–136. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.024.

Original article

CO₂ HYDROGENATION REACTION ON BIMETALLIC CATALYSTS BASED ON DOUBLE COMPLEX SALTS

Alevtina N. Gosteva¹, Alena A. Grabchak², Sergey A. Svidersky³, Mayya V. Kulikova⁴

¹Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia

^{2, 3, 4}A. V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, RAS, Moscow, Russia

¹angosteva@list.ru

²ale.grabchak@ips.ac.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0504-5342>

³<https://orcid.org/0000-0002-1905-1946>

⁴<https://orcid.org/0000-0003-2235-8989>

Abstract

The influence of the method of obtaining a catalyst based on double complex salts of iron and cobalt—thermolysis or hydrothermal synthesis—on its properties during the hydrogenation of CO₂ has been studied. It has been established that the use of the hydrothermal synthesis method makes it possible to achieve a higher CO₂ conversion (up to 51.5 %) than in the case of obtaining a catalyst by thermolysis (up to 27 %), however, the selectivity of the catalyst obtained by thermolysis for C₅₊ hydrocarbons is higher than for the analogue obtained by hydrothermal synthesis.

Keywords:

CO₂ hydrogenation, catalysis, double complex compound, bimetallic catalyst, thermolysis, hydrothermal synthesis

Acknowledgments:

This manuscript was created under the financial support of a Russian Science Foundation grant number 24-29-20076.

Funding:

Russian Science Foundation grant number 24-29-20076.

For citation:

CO₂ hydrogenation reaction on bimetallic catalysts based on double complex salts / A. N. Gosteva [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 130–136. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.024.

Введение

Оксиды углерода, выбрасываемые в атмосферу в результате осуществления хозяйственной деятельности человека, являются токсичными, оказывают негативное влияние на здоровье человека и состояние окружающей среды. Вовлечение оксидов углерода, в частности CO₂, в химические процессы, позволяющие получать ценные продукты, — наиболее рациональный путь сокращения их выбросов в атмосферу. Эффективным способом использования CO₂ является гидрирование его до углеводородов C₅₊ либо метана. Углеводороды C₅₊, получаемые в процессе гидрирования CO₂, могут быть использованы в качестве компонентов топлива или химического сырья. Метан может быть возвращен в промышленные процессы в качестве топлива, тем самым CO₂ может быть вовлечен в замкнутый производственный цикл, исключая его выбросы в атмосферу.

Наиболее распространенными катализаторами гидрирования CO₂ до CH₄ являются никелевые [1–10]. В качестве наиболее перспективных для получения углеводородов C₂₊ рассматриваются катализаторы на основе железа, кобальта и меди [11; 12], а также биметаллические железно-кобальтовые [13–15]. Способ получения биметаллического катализатора должен обеспечивать синергию активных фаз [13]. Термолиз двойных комплексных солей железа и кобальта является одним из возможных путей достижения синергии Fe и Co в составе активных центров [14; 15].

Результаты

Гидротермальный синтез проводили в стальном автоклаве с тефлоновым вкладышем (объем вкладыша 50 мл). В автоклав загружали навеску двойной комплексной соли [Co(NH₃)₆][Fe(CN)₆], заливали расчетным количеством дистиллированной воды. Процесс проводили с перемешиванием при 80 об/мин и температуре до 200 °C в течение двух часов. После охлаждения автоклавной бомбы твердый продукт отфильтровывали от маточника, промывали дистиллированной водой и сушили до постоянной массы.

Термолиз [Co(NH₃)₆][Fe(CN)₆]₃ проводили в токе аргона (чистота 99,999 %) при 650 °C в течение 1 ч, температуру повышали от 20 до 650 °C со скоростью 10 °C/мин.

Каталитические испытания проводили без стадии предварительной активации в температурном диапазоне от 230 до 320 °C с шагом 20 °C и выдержкой в течение 12 ч для каждой температуры при давлении 2,0 МПа в проточной установке со стационарным слоем катализатора, газообразные реагенты (H₂:CO₂ = 3:1) подавали при объемной скорости (GHSV = 1 500 ч⁻¹).

Образец катализатора, полученный гидротермальным синтезом, был обозначен FeCo-HTS, полученный термолизом — FeCo-THR. Результаты каталитических исследований представлены в таблице.

Важнейшим показателем эффективности катализатора в процессе гидрирования являлась конверсия CO₂ (рис. 1). В присутствии катализатора FeCo-HTS данный показатель был значительно выше и достигал 52 % против наибольшего значения в 26 % для FeCo-THR. Однако для FeCo-HTS данный показатель был близок к наибольшей величине уже при 270 °C (49 %), и дальнейшее повышение температуры до 290 °C уже не приводило к его существенному повышению. Для катализатора FeCo-THR конверсия CO₂ монотонно возрастала во всем изученном диапазоне температур, но не превышала 26 %.

В присутствии катализатора FeCo-HTS преобладающим продуктом реакции гидрирования CO₂ являлся метан — селективность по данному продукту во всем изученном диапазоне температур колебалась в диапазоне 45–52 % мас. (рис. 2). Для образца FeCo-THR селективность по CH₄ была намного ниже, чем для аналога, полученного гидротермальным синтезом, и монотонно возрастала от 5 до 17 % мас.

Влияние температуры процесса гидрирования CO_2 на селективность в присутствии биметаллических катализаторов, полученных термоллизом и гидротермальным синтезом

Температура, °C	Конверсия CO ₂ , %	Селективность, %мас.			
		C ₁	C ₂ -C ₄	C ₅₊	CO
FeCo-THR					
230	12	5	2	78	15
250	14	7	3	73	17
270	18	11	4	62	23
290	21	14	4	55	27
310	26	17	4	54	25
FeCo-HTS					
230	6	52	11	37	73
250	30	45	35	17	15
270	49	49	40	8	4
290	52	50	41	9	4

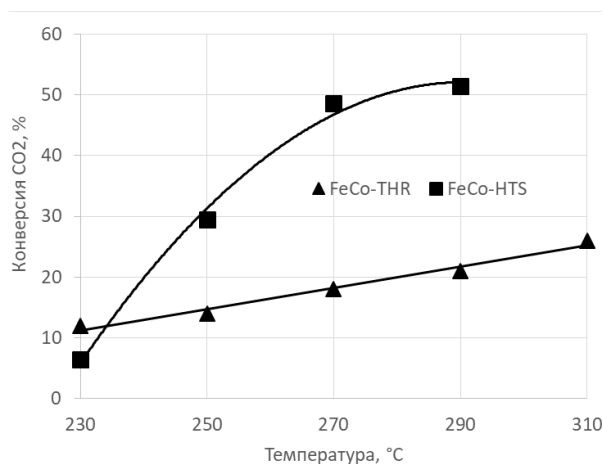


Рис. 1. Зависимости конверсии в реакции гидрирования CO_2 от температуры в присутствии катализаторов FeCo-HTS и FeCo-THR

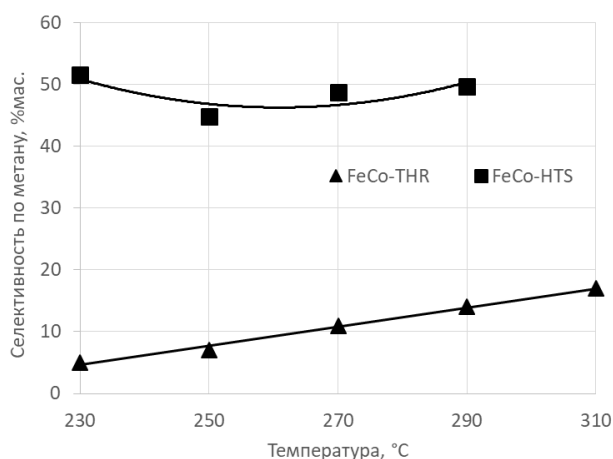


Рис. 2. Зависимости селективности по метану в реакции гидрирования CO_2 от температуры в присутствии катализаторов FeCo-HTS и FeCo-THR

Зависимости селективности по углеводородам C_{5+} для обоих рассматриваемых образцов были сходны — данный показатель снижался с повышением температуры процесса (рис. 3). Катализатор FeCo-THR, полученный термолизом, характеризовался значительно более высокими значениями селективности по C_{5+} во всем изученном диапазоне температур — с повышением температуры его величина снижалась от 78 до 54 % мас., для FeCo-HTS — от 37 до 9 % мас.

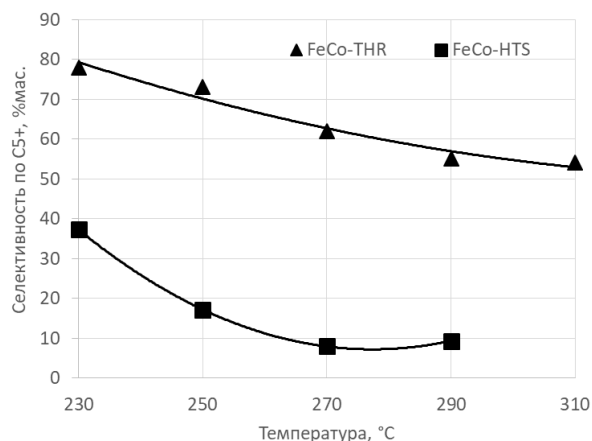


Рис. 3. Зависимости селективности по углеводородам C_{5+} в реакции гидрирования CO_2 от температуры в присутствии катализаторов FeCo-HTS и FeCo-THR

Для образца FeCo-HTS наблюдали нетипичную для процессов гидрирования оксидов углерода зависимость от температуры для селективности по C_{2+} — данный показатель был практически стабилен во всем изученном диапазоне температур и составлял ~50 % мас. (рис. 4). В присутствии FeCo-THR зависимость данного показателя от температуры имела типичный характер с выраженной тенденцией к снижению с увеличением температуры (от 80 до 58 % мас.).

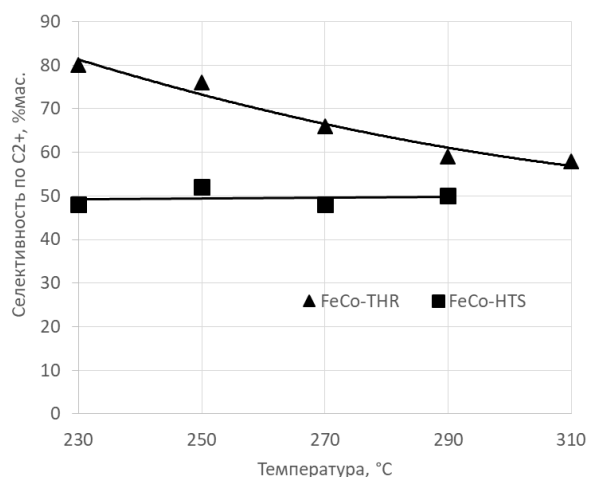


Рис. 4. Зависимости селективности по углеводородам C_{2+} в реакции гидрирования CO_2 от температуры в присутствии катализаторов FeCo-HTS и FeCo-THR

На основании результатов каталитических исследований было показано, что способ получения катализатора для процесса гидрирования CO_2 на основе двойных комплексных солей оказывает принципиальное влияние на конверсию сырья и состав получаемых продуктов. Так, для образца FeCo-THR, полученного термолизом, основными продуктами являются углеводороды C_{5+} , что свидетельствует о преобладании роста цепи над прямым гидрированием и относительно низкой

вероятности обрыва цепи. Наличие в составе продукта значительных количеств СО, являющегося промежуточным продуктом гидрирования CO_2 в углеводороды, подтверждает недостаточно высокую активность катализатора в реакциях гидрирования. Согласно представлению о механизме гидрирования оксидов углерода, предполагается, что на первой стадии происходит гидрирование CO_2 до СО, после чего происходит реадсорбция СО и его взаимодействие с водородом, в ходе которого возможно образование различных интермедиатов CH_x [16]. Исходя из данного представления, недостаточная гидрирующая активность катализатора в случае гидрирования CO_2 способствует повышению селективности по углеводородам C_{5+} (вероятность продолжения полимеризации превышает вероятность обрыва цепи гидрированием), но является ограничением его общей активности, что наблюдается в случае катализатора FeCo-THR в виде относительно низкой конверсии CO_2 . В случае катализатора FeCo-HTS, напротив, содержание СО в продуктах реакции минимально (3–4 % мас.), а основным продуктом реакции является метан, что свидетельствует о высокой гидрирующей активности и преобладании гидрирования над полимеризацией. Продуктами полимеризации являются преимущественно углеводородные газы $\text{C}_2\text{--C}_4$, что является следствием высокой вероятности обрыва цепи за счет гидрирования. За счет интенсивного протекания реакции гидрирования конверсия CO_2 значительно выше, чем для FeCo-THR, но при достижении величины данного показателя ~50 % фактически достигается предел и дальнейший рост конверсии ограничивается, вероятно, нехваткой активных центров.

Результаты каталитического эксперимента согласуются с данными рентгенофазового анализа (рис. 5). Для обоих образцов после процесса гидрирования CO_2 основной кристаллизованной фазой был сплав СоFe в упорядоченном состоянии (база данных PDF#49-1567). Данный тип активных центров способствует протеканию реакции сдвига водяного газа. В результате реакции, протекающей на железосодержащих фрагментах, образуется монооксид углерода, который может реадсорбироваться на кобальтсодержащем фрагменте частицы и затем гидрироваться до интермедиатов CH_x либо метана. В случае образца FeCo-THR было отмечено присутствие фаз, активных в процессе полимеризации интермедиатов CH_x , таких как карбиды Fe_7C_3 (база данных JCPDS-75-1499) и $\chi\text{-Fe}_5\text{C}_2$ (база данных JCPDS-51-0997), а также магнетита Fe_3O_4 (база данных JCPDS-79-0419). Доля данных фаз в составе образца относительно невелика, что согласуется с наблюдаемой в каталитическом эксперименте относительно невысокой конверсией CO_2 . Для образца FeCo-HTS, помимо фазы железо-кобальтового сплава, отмечено присутствие CoFe_2O_4 (база данных JCPDS- 22-1086), CoO (база данных JCPDS-43-1004), Fe_3C (база данных JCPDS-72-1110), Co_3C (база данных JCPDS-026-0450) и $\alpha\text{-Co}$ (база данных JCPDS Card No. 05-0727). В этом наборе фаз преобладают катализирующие гидрирование, в первую очередь $\alpha\text{-Co}$ и CoO , присутствие Fe_3C и Co_3C обеспечивает протекание полимеризации интермедиатов CH_x , но содержание этих фаз невелико, преобладают гидрирующие фазы, что согласуется с составом получаемых продуктов — преобладают метан и углеводороды $\text{C}_2\text{--C}_4$, конверсия CO_2 ограничена относительно невысоким содержанием каталитически активных фаз.

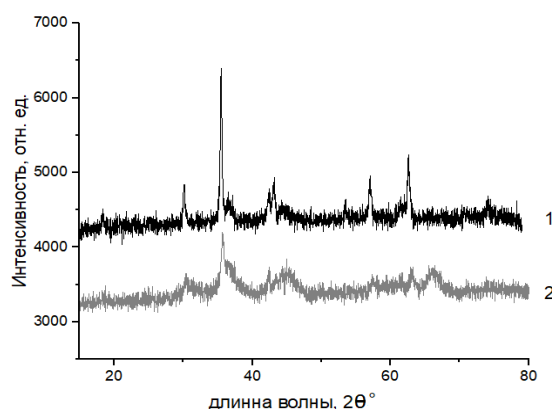


Рис. 5. Спектры РФА катализаторов FeCo-THR (1) и FeCo-HTS (2)

Выводы

Изучено влияние метода получения катализатора на основе двойных комплексных солей железа и кобальта — термоллиз либо гидротермальный синтез — на его свойства в процессе гидрирования CO_2 . Установлено, что применение метода гидротермального синтеза позволяет достичь более высокой конверсии CO_2 (до 51,5 %), чем в случае получения катализатора методом термоллиза (до 27 %), однако селективность катализатора, полученного термоллизом, по углеводородам C_{5+} выше, чем для аналога, полученного гидротермальным синтезом. Установлено, что применение различных методов приготовления катализатора — термоллиза либо гидротермального синтеза — приводит к существенным различиям в фазовом составе катализаторов. Основными каталитически активными фазами катализатора, полученного термоллизом, являются карбиды железа Fe_7C_3 и $\chi\text{-Fe}_5\text{C}_2$, катализирующие полимеризацию интермедиатов CN_x с образованием углеводородов C_{5+} ; для образца, полученного гидротермальным синтезом, наибольшую каталитическую активность проявляют фазы $\alpha\text{-Co}$ и CoO , катализирующие реакции гидрирования с образованием в качестве основного продукта метана. Таким образом, изменение метода получения катализатора гидрирования CO_2 на основе двойных комплексных солей позволяет получить различные составы активной фазы и изменять направление применения катализатора для получения синтетических жидких углеводородов либо метана.

Список источников

1. Dement'ev K. I., Dementeva O. S., Ivantsov M. I., Kulikova M. V., Magomedova M. V., Maximov A. L., Lyadov A. S., Starozhitskaya A. V., Chudakova M. V. Promising approaches to carbon dioxide processing using heterogeneous catalysts (a review) // *Petroleum Chemistry*. 2022. Vol. 62. P. 445–474.
2. Muroyama H., Tsuda Y., Asakoshi T., Masitah H., Okanishi T., Matsui T., Eguchi K. Carbon dioxide methanation over Ni catalysts supported on various metal oxides // *Journal of Catalysis*. 2016. Vol. 343. P. 178–184.
3. Cárdenas-Arenas A., Cortés H. S., Bailón-García E., Davó-Quinónero A., Lozano-Castelló D., BuenoLópez, A. Active, selective and stable NiO-CeO_2 nanoparticles for CO_2 methanation // *Fuel Processing Technology*. 2021. Vol. 212 (106637). P. 1–8.
4. García-Moncada N., Navarro J. C., Odriozola J. A., Lefferts L., Faria J. A. Enhanced catalytic activity and stability of nanoshaped Ni/CeO_2 for CO_2 methanation in micro-monoliths // *Catalysis Today*. 2022. Vol. 383. P. 205–215.
5. Huynh H. L., Tucho W. M., Yu. Z. Structured NiFe catalysts derived from in-situ grown layered double hydroxides on ceramic monolith for CO_2 methanation // *Green Energy & Environment*. 2020. Vol. 5 (4) P. 423–432.
6. Fang X., Xia L., Li S., Hong Z., Yang M., Xu X., Xu J., Wang X. Superior 3DOM $\text{Y}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ supports for Ni to fabricate highly active and selective catalysts for CO_2 methanation // *Fuel*. 2021. Vol. 293 (120460). P. 1–13.
7. Ye R. P., Liao L., Reina T. R., Liu J., Chevella D., Jin Y., Fan M., Liu J. Engineering Ni/SiO_2 catalysts for enhanced CO_2 methanation // *Fuel*. 2021. Vol. 285 (119151). P. 1–10.
8. Yan Z., Liu Q., Liang L., Ouyang J. Surface hydroxyls mediated CO_2 methanation at ambient pressure over attapulgite-loaded Ni-TiO_2 composite catalysts with high activity and reuse ability // *Journal of CO_2 Utilization*. 2021. Vol. 47 (101489). P. 1–12.
9. Riani P., Valsamakis I., Cavattoni T., Escribano V. S., Busca G., Garbarino G. $\text{Ni/SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ catalysts for CO_2 methanation: Effect of La_2O_3 addition // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2021. Vol. 284 (119697). P. 1–12.
10. Gao Y., Dou L., Zhang S., Zong L., Pan J., Hu X., Sun H., Ostrikov K., Shao T. Coupling bimetallic Ni-Fe catalysts and nanosecond pulsed plasma for synergistic low-temperature CO_2 methanation // *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 420 (127693). P. 1–13.
11. Iqbal M. M. A., Bakar W. A. W. A., Toemen S., Razak F. I. A., Azelee N. I. W. Optimization study by Box-Behnken design (BBD) and mechanistic insight of CO_2 methanation over $\text{Ru-Fe-Ce}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ catalyst by in-situ FTIR technique // *Arabian Journal of Chemistry*. 2020. Vol. 13 (2). P. 4170–4179.
12. Chaipraditgul N., Numpilai T., Cheng C. K., Siri-Nguan N., Sornchamni T., Wattanakit C., Limtrakul J., Witoon T. Tuning interaction of surface-adsorbed species over $\text{Fe/K-Al}_2\text{O}_3$ modified with transition metals (Cu, Mn, V, Zn or Co) on light olefins production from CO_2 hydrogenation // *Fuel*. 2021. Vol. 283 (119248). P. 1–8.
13. Svidersky S. A., Dement'eva O. S., Ivantsov M. I., Grabchak A. A., Kulikova M. V., Maximov A. L. Hydrogenation of CO_2 over Biochar-Supported Catalysts // *Petroleum Chemistry*. 2023. Vol. 63. P. 443–452.
14. Gosteva A. N., Kulikova M. V., Semushina Y. P., Chudakova M. V., Tsvetov N. S., Semushin V. V. Catalytic Activity of Thermolyzed $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6][\text{Fe}(\text{CN})_6]$ in CO Hydrogenation Reaction // *Molecules*. 2021. Vol. 26. P. 3782.
15. Gosteva A. N., Kulikova M. V., Ivantsov M. I., Grabchak A. A., Semushina Y. P., Lapuk S. E., Gerasimov A. V., Tsvetov N. S. CO_2 Hydrogenation over Fe-Co Bimetallic Catalyst Derived from the Thermolysis of $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6][\text{Fe}(\text{CN})_6]$ // *Catalysts*. 2023. Vol. 13. P. 1475.
16. Rommens K. T., Saeys M. Molecular views on Fischer–Tropsch Synthesis // *Chemical Reviews*. 2023. Vol. 123 (9). P. 5798–5858.

References

1. Dement'ev K. I., Dementeva O. S., Ivantsov M. I., Kulikova M. V., Magomedova M. V., Maximov A. L., Lyadov A. S., Starozhitskaya A. V., Chudakova M. V. Promising approaches to carbon dioxide processing using heterogeneous catalysts (a review). *Petroleum Chemistry*, 2022, Vol. 62, pp. 445–474.
2. Muroyama H., Tsuda Y., Asakoshi T., Masitah H., Okanishi T., Matsui T., Eguchi K. Carbon dioxide methanation over Ni catalysts supported on various metal oxides. *Journal of Catalysis*, 2016, Vol. 343, pp. 178–184.
3. Cárdenas-Arenas A., Cortés H. S., Bailón-García E., Davó-Quinonero A., Lozano-Castelló D., BuenoLópez, A. Active, selective and stable NiO-CeO₂ nanoparticles for CO₂ methanation. *Fuel Processing Technology*, 2021, Vol. 212, No. 106637, pp. 1–8.
4. García-Moncada N., Navarro J. C., Odriozola J. A., Lefferts L., Faria J. A. Enhanced catalytic activity and stability of nanoshaped Ni/CeO₂ for CO₂ methanation in micro-monoliths. *Catalysis Today*, 2022, Vol. 383, pp. 205–215.
5. Huynh H. L., Tucho W. M., Yu Z. Structured NiFe catalysts derived from in-situ grown layered double hydroxides on ceramic monolith for CO₂ methanation. *Green Energy & Environment*, 2020, Vol. 5, No. 4, pp. 423–432.
6. Fang X., Xia L., Li S., Hong Z., Yang M., Xu X., Xu J., Wang, X. Superior 3DOM Y₂Zr₂O₇ supports for Ni to fabricate highly active and selective catalysts for CO₂ methanation. *Fuel*, 2021, Vol. 293, No. 120460, pp. 1–13.
7. Ye R. P., Liao L., Reina T. R., Liu J., Chevella D., Jin Y., Fan M., Liu J. Engineering Ni/SiO₂ catalysts for enhanced CO₂ methanation. *Fuel*, 2021, Vol. 285, No. 119151, pp. 1–10.
8. Yan Z., Liu Q., Liang L., Ouyang J. Surface hydroxyls mediated CO₂ methanation at ambient pressure over attapulgite-loaded Ni-TiO₂ composite catalysts with high activity and reuse ability. *Journal of CO₂ Utilization*, 2021, Vol. 47, No. 101489, pp. 1–12.
9. Riani P., Valsamakis I., Cavattoni T., Escribano V. S., Busca G., Garbarino G. Ni/SiO₂-Al₂O₃ catalysts for CO₂ methanation: Effect of La₂O₃ addition. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2021, Vol. 284, No. 119697, pp. 1–12.
10. Gao Y., Dou L., Zhang S., Zong L., Pan J., Hu X., Sun H., Ostrikov K., Shao T. Coupling bimetallic Ni-Fe catalysts and nanosecond pulsed plasma for synergistic low-temperature CO₂ methanation. *Chemical Engineering Journal*, 2021, Vol. 420, No. 127693, pp. 1–13.
11. Iqbal M. M. A., Bakar W. A. W. A., Toemen S., Razak F. I. A., Azelee N. I. W. Optimization study by Box-Behnken design (BBD) and mechanistic insight of CO₂ methanation over Ru-Fe-Ce/γ-Al₂O₃ catalyst by in-situ FTIR technique. *Arabian Journal of Chemistry*, 2020, Vol. 13, No. 2, pp. 4170–4179.
12. Chaipraditgul N., Numpilai T., Cheng C. K., Siri-Nguan N., Sornchamni T., Wattanakit C., Limtrakul J., Witoon T. Tuning interaction of surface-adsorbed species over Fe/K-Al₂O₃ modified with transition metals (Cu, Mn, V, Zn or Co) on light olefins production from CO₂ hydrogenation. *Fuel*, 2021, Vol. 283, No. 119248, pp. 1–8.
13. Svidersky S. A., Dement'eva O. S., Ivantsov M. I., Grabchak A. A., Kulikova M. V., Maximov A. L. Hydrogenation of CO₂ over Biochar-Supported Catalysts. *Petroleum Chemistry*, 2023, Vol. 63, pp. 443–452.
14. Gosteva A. N., Kulikova M. V., Semushina Y. P., Chudakova M. V., Tsvetov N. S., Semushin V. V. Catalytic Activity of Thermolyzed [Co(NH₃)₆][Fe(CN)₆] in CO Hydrogenation Reaction. *Molecules*, 2021, Vol. 26, pp. 3782.
15. Gosteva A. N., Kulikova M. V., Ivantsov M. I., Grabchak A. A., Semushina Y. P., Lapuk S. E., Gerasimov A. V., Tsvetov N. S. CO₂ Hydrogenation over Fe-Co Bimetallic Catalyst Derived from the Thermolysis of [Co(NH₃)₆][Fe(CN)₆]. *Catalysts*, 2023, Vol. 13, pp. 1475.
16. Rommens K. T., Saeyns M. Molecular views on Fischer–Tropsch Synthesis. *Chemical Reviews*, 2023, Vol. 123, No. 9, pp. 5798–5858.

Информация об авторах

А. Н. Гостева — кандидат химических наук, старший научный сотрудник;

А. А. Грабчак — младший научный сотрудник;

С. А. Сви́дерский — кандидат химических наук, старший научный сотрудник;

М. В. Куликова — доктор наук, главный научный сотрудник.

Information about the authors

A. N. Gosteva — Ph.D., Senior Researcher;

A. A. Grabchak — Research Assistant;

S. A. Svidersky — Ph.D, Senior Researcher;

M. V. Kulikova — DSc, Principal Researcher.

Статья поступила в редакцию 02.07.2025; одобрена после рецензирования 23.07.2025; принята к публикации 06.08.2025.
The article was submitted 02.07.2025; approved after reviewing 23.07.2025; accepted for publication 06.08.2025.