

ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)
УДК 544.478
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2023-59-2-105-114>

Поступила в редакцию 19.10.2022
Received 19.10.2022

С. М. Зульфугарова, Г. Р. Азимова, З. Ф. Алескерова, Г. М. Гусейнли, Д. Б. Тагиев

*Институт катализа и неорганической химии Национальной академии наук Азербайджана,
Баку, Азербайджан
Институт природных ресурсов Национальной академии наук Азербайджана,
Нахчыван, Азербайджан*

КАТАЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ Co, Cu, Mn ОКСИДНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ С ГОРЕНИЕМ, В РЕАКЦИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСЛЕНИЯ ОКСИДА УГЛЕРОДА

Аннотация. Осуществлен синтез катализаторов на основе оксидов кобальта, меди и марганца золь-гель методом с горением и изучена их каталитическая активность в реакции низкотемпературного окисления монооксида углерода в диоксид. Синтезированы оксиды кобальта, меди и марганца, а также их двойные оксиды Co–Mn, Cu–Mn и Co–Cu. Рентгенофазовым анализом показано образование в системах Co–Mn и Cu–Mn манганитов и оксидов соответствующих металлов. В системе Co–Cu выявлено образование только оксидов этих металлов. Установлено, что кобальт- и медь-марганцевые оксидные системы, синтезированные золь-гель методом с горением, проявляют высокую каталитическую активность в низкотемпературном (110–140 °С) превращении монооксида углерода в диоксид. Осуществлен одностадийный синтез каталитической системы Cu–Mn/Al₂O₃ золь-гель методом со сжиганием прекурсоров с гидрогелем связующего (Al₂O₃) и установлена ее высокая активность в низкотемпературной конверсии монооксида углерода. Каталитические системы исследовали РФ-, ИК-спектральными методами, БЭТ, СЭМ. Полученные результаты показывают возможность получения активных в низкотемпературном окислении монооксида углерода многокомпонентных оксидных катализаторов технологически простым золь-гель методом с горением.

Ключевые слова: монооксид углерода, низкотемпературное окисление, золь-гель метод с горением, оксидные катализаторы

Для цитирования. Каталитическая активность Co, Cu, Mn оксидных катализаторов, полученных золь-гель методом с горением, в реакции низкотемпературного окисления оксида углерода / С. М. Зульфугарова [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2023. – Т. 59, № 2. – С. 105–114. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2023-59-2-105-114>

S. M. Zulfugarova, G. R. Azimova, Z. F. Aleskerova, G. M. Guseinli, D. B. Tagiev

*Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan
Institute of Natural Resources of the National Academy of Sciences of Azerbaijan, Nakhchivan, Azerbaijan*

CATALYTIC ACTIVITY OF Co, Cu AND Mn OXIDE CATALYSTS SYNTHESIZED BY THE SOL-GEL COMBUSTION METHOD IN THE LOW-TEMPERATURE OXIDATION OF CARBON OXIDE

Abstract. The synthesis of catalysts based on cobalt, copper and manganese oxides by sol-gel method with combustion was carried out, and their catalytic activity was studied in the reaction of low-temperature oxidation of carbon monoxide to dioxide. Oxides of cobalt, copper and manganese, as well as their double oxides (Co–Mn, Cu–Mn and Co–Cu) were synthesized. X-ray phase analysis showed the formation of manganites and oxides of corresponding metals in the Co–Mn and Cu–Mn systems. It was revealed that in the Co–Cu system only oxides of separate metals are formed. It was found that cobalt-manganese and copper-manganese oxide systems synthesized by sol-gel combustion method exhibit high catalytic activity in the low-temperature (110–140 °C) conversion of carbon monoxide into dioxide. One-step synthesis of Cu–Mn/Al₂O₃ catalytic system was also carried out by sol-gel method with burning precursors with binder hydrogel (Al₂O₃), and its high activity in low-temperature conversion of carbon monoxide was revealed. The catalytic systems were investigated by X-ray diffraction, IR spectral methods, BET, SEM. The results obtained show the possibility of obtaining active multicomponent oxide catalysts in low-temperature oxidation of carbon monoxide by technologically simple sol-gel combustion method.

Keywords: carbon monoxide, low-temperature oxidation, combustion sol-gel method, oxide catalysts

For citation. Zulfugarova S. M., Azimova G. R., Aleskerova Z. F., Guseinli G. M., Tagiev D. B. Catalytic activity of Co, Cu and Mn oxide catalysts synthesized by the sol-gel combustion method in the low-temperature oxidation of carbon oxide. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnyh navuk = Proceedings of the National Academy of Science of Belarus. Chemical series*, 2023, vol. 59, no. 2, pp. 105–114 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2023-59-2-105-114>

Введение. Разработка катализаторов окисления монооксида углерода в диоксид имеет большое практическое значение для решения проблемы техногенного загрязнения окружающей среды. Применяемые в настоящее время на транспорте и в промышленности катализаторы нейтрализации выбросов монооксида углерода на основе благородных металлов обладают высокой каталитической активностью при относительно невысоких температурах и в то же время дорогостоящие, что стимулирует поиск новых каталитических систем без использования благородных металлов [1–3]. Поэтому разработка различных методов синтеза активных катализаторов окисления монооксида углерода, состоящих из простых и сложных оксидов для замены благородных металлов, не теряет своей актуальности и остается в центре внимания специалистов, работающих в области гетерогенного катализа [4–7]. Активность катализаторов зависит от химического состава и различных параметров структуры, таких как природа активных центров, дисперсность, структура поверхности катализатора, наличие в структуре дефектов. Они в свою очередь также определяются условиями синтеза катализаторов. В последние годы в традиционных способах получения гетерогенных катализаторов – соосаждение, разложение солей, золь-гель метод, керамический, сжигание растворов в высокотемпературном потоке – применяют различные виды воздействия: механическое (механохимия) [8, 9], микроволновое (СВЧ-химия) [10–15].

Один из перспективных методов синтеза катализаторов – золь-гель метод с горением, в котором используется энергия экзотермической реакции взаимодействия компонентов на основе систем, содержащих окислитель (нитрат металла) и восстановитель (растворимые в воде органические амины, кислоты и аминокислоты) в качестве комплексобразователя и «топлива» [16, 17]. Основные преимущества этого метода – низкие энергетические затраты, короткое время синтеза, отсутствие необходимости использования дорогостоящего оборудования, одностадийное превращение исходных материалов в конечные продукты с применением химической энергии реакции. Появилось немало работ, посвященных синтезу многокомпонентных оксидных систем, в том числе со структурой шпинелей, золь-гель методом с горением, которые используют в различных реакциях, в том числе и окислении монооксида углерода в диоксид [17–21]. К наиболее изучаемым катализаторам реакции окисления монооксида углерода в диоксид относятся катализаторы на основе оксидов кобальта, марганца, меди [1, 17, 22–25].

Цель данного исследования – синтез катализаторов на основе оксидов кобальта, меди и марганца золь-гель методом с горением и изучение их активности в реакции низкотемпературного окисления монооксида углерода в диоксид.

Экспериментальная часть. Прекурсоры: $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (лимонная кислота).

Синтез индивидуальных оксидов проводили следующим образом. 1 моль нитрата металла и 1 моль лимонной кислоты растворяли в дистиллированной воде и перемешивали на магнитной мешалке до образования геля. Полученный гель помещали в нагретый до 175–190 °С сушильный шкаф, в котором происходило его полное высыхание и затем возгорание. Двойные Co–Mn, Cu–Mn и Co–Cu оксидные системы синтезированы по вышеуказанной методике. Соотношение органического реагента к соответствующим металлам – 2 : 1. Также синтезированы образцы катализаторов горением раствора солей металлов с лимонной кислотой.

Рентгенофазовый анализ продуктов проведен на автоматическом дифрактометре «D 2Phazer» фирмы Bruker с источником $\text{CuK}\alpha$ -излучения. ИК-спектры сняты на спектрометре FTIR Alfa фирмы Bruker. Измерение удельной поверхности образцов определяли низкотемпературной адсорбцией азота по многоточечному методу БЭТ на приборе SORBI-MS (Россия). Микрофотографии образцов сделаны на электронном микроскопе Hitachi. Полученные порошки оксидных систем в количестве 1 г смешивали со связующим алюмогелем, формовали в гранулы, сушили на воздухе, дальнейшую термическую обработку проводили в сушильном шкафу и муфельной печи при температуре 135 и 500 °С соответственно. Окисление CO проводили проточным методом при соотношении CO : воздух = 1 : (3–5), объемной скорости 6000–12000 ч⁻¹. Анализ проводили на хроматографе ЛХМ в двух колонках с сорбентами CaA и поропак Q. На рис. 1 представлены фотографии некоторых образцов, полученных в результате сжигания.



Рис. 1. Образцы катализаторов, полученные в результате горения геля:
 1 – Co–Mn = 1 : 1; 2 – Co–Cu = 1 : 1; 3 – Cu–Mn = 2 : 1

Fig. 1. Samples of catalysts obtained by gel combustion: 1 – Co–Mn = 1 : 1; 2 – Co–Cu = 1 : 1; 3 – Cu–Mn = 2 : 1

Результаты и их обсуждение. Каталитическая активность индивидуальных оксидов. Согласно рентгенофазовому анализу синтезированные золь-гель методом с горением оксид кобальта и марганца представляют собой Co_3O_4 и Mn_3O_4 . На рис. 2 представлена температурная зависимость конверсии оксида углерода и кривые повышения температуры от времени в ходе реакции окисления CO на оксидах кобальта, марганца и меди.

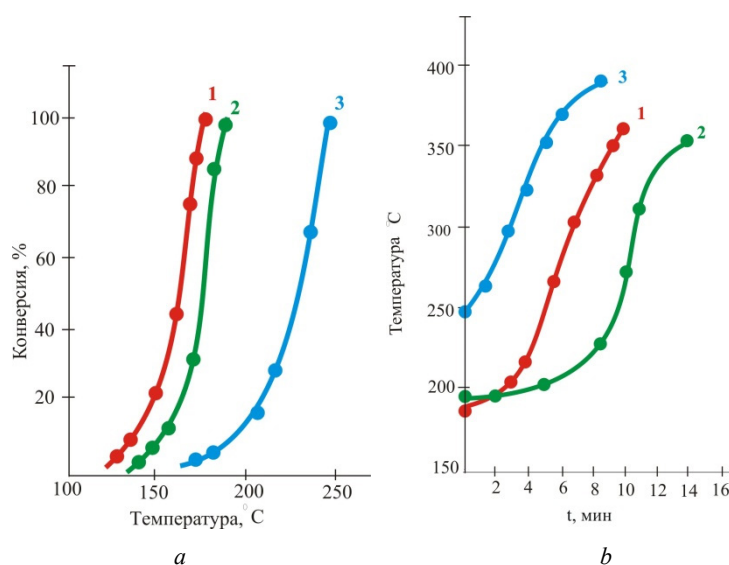


Рис. 2. Зависимость конверсии монооксида углерода от температуры (a) и кривые повышения температуры в ходе реакции окисления CO (b) на оксидах кобальта (1), марганца (2) и меди (3)

Fig. 2. Carbon monoxide conversion dependence on temperature (a) and temperature rise curves during the CO oxidation reaction (b) on cobalt (1), manganese (2) and copper (3) oxides

Из рис. 2 видно, что 100 %-ная конверсия монооксида углерода в присутствии синтезированного катализатора Co_3O_4 достигается при температуре 180 °C, на оксиде марганца – при 190 °C и на оксиде меди – при 250 °C. Поскольку превращение монооксида углерода в диоксид углерода является экзотермической реакцией, в ходе реакции наблюдается повышение температуры. Динамика повышения температуры (150–200 °C) дает информацию об активности катализатора, поэтому на рис. 2, b показана зависимость повышения температуры от времени для всех образцов исследуемых оксидов. Откуда следует, что 100 %-ная конверсия оксида углерода на этих катализаторах достигается в начальные минуты реакции (рис. 2, b).

Каталитическая активность двойных оксидов. Синтезированные двойные оксидные системы металлов Co, Cu и Mn исследованы рентгенофазовым (рис. 3) и ИК-спектральными методами. Фазовый состав полученных катализаторов представлен в табл. 1.

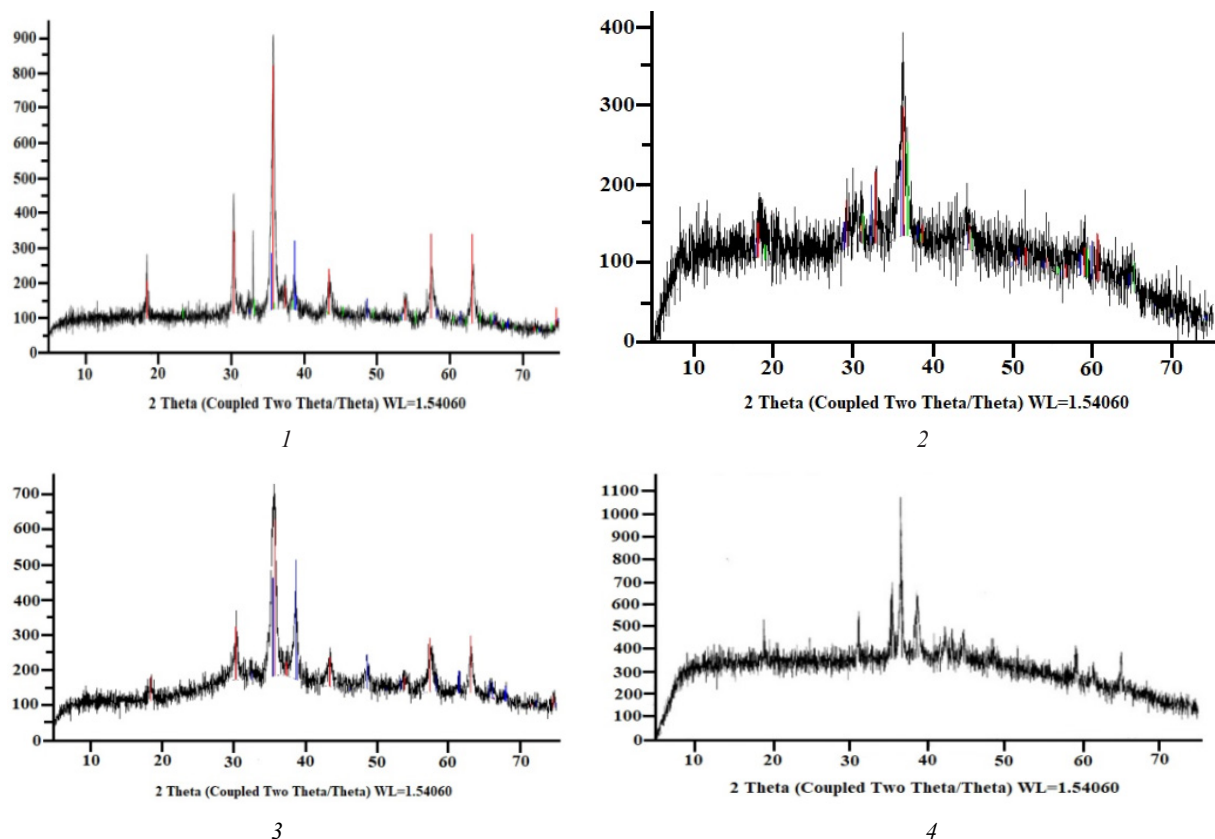


Рис. 3. Дифрактограммы синтезированных бинарных оксидных систем: 1 – Co–Mn = 1 : 1; 2 – Cu–Mn = 1 : 1; 3 – Cu–Mn = 2 : 1; 4 – Co–Cu = 1 : 1

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of the synthesized binary oxide systems: 1 – Co–Mn = 1 : 1; 2 – Cu–Mn = 1 : 1; 3 – Cu–Mn = 2 : 1; 4 – Co–Cu = 1 : 1

Т а б л и ц а 1. Фазовый состав двойных оксидных систем

T a b l e 1. Phase composition of double oxide systems

Катализатор	Фазовый состав, %
Co–Mn = 1 : 1	CoMn ₂ O ₄ 48,0
	Mn ₃ O ₄ 29,5
	Co ₃ O ₄ 22,5
Cu–Mn = 1 : 1	CuMn ₂ O ₄ 69,3
	CuO 25,5
	Mn ₂ O ₃ 5,1
Cu–Mn = 2 : 1	CuMn ₂ O ₄ 50,1
	CuO 49,9
	Co ₃ O ₄ 50,6
Co–Cu = 1 : 1	CuO 46,7
	Cu ₂ O 2,7

Как видно из табл. 1, в полученных системах наряду с бинарными оксидами шпинелевого типа (CoMn₂O₄, CuMn₂O₄) образуются также оксиды кобальта, марганца и меди. В системах Co–Mn и Cu–Mn при соотношении металлов 1 : 1 наблюдаются оксиды обоих металлов. На дифрактограмме системы Cu–Mn = 2 : 1 видны только рефлексы оксида меди. Количество манганита, образующегося во всех системах, больше, чем оксидов и составляет 48–69 %. В системе

Co–Cu обнаружены только оксиды Co_3O_4 , CuO и Cu_2O . В ИК-спектрах систем Co–Mn, Cu–Mn наблюдаются полосы поглощения при 665 см^{-1} . Полосы поглощения от 400 до 800 см^{-1} в ИК-спектре характеризуют связи Me–O тетраэдрически координированных ионов в шпинелях [21–23]. Полосы поглощения в диапазоне 900 – 1400 см^{-1} ($1168,97$, $1376,97$, $1462,90$) относятся к деформационным колебаниям MeOH.

Эксперименты показали, что двойные системы проявляют высокую каталитическую активность при более низких температурах, чем индивидуальные оксиды (рис. 4, а). Так, на катализаторе Co–Mn = 1 : 1 монооксид углерода полностью превращается в диоксид при 140 – 150 °C .

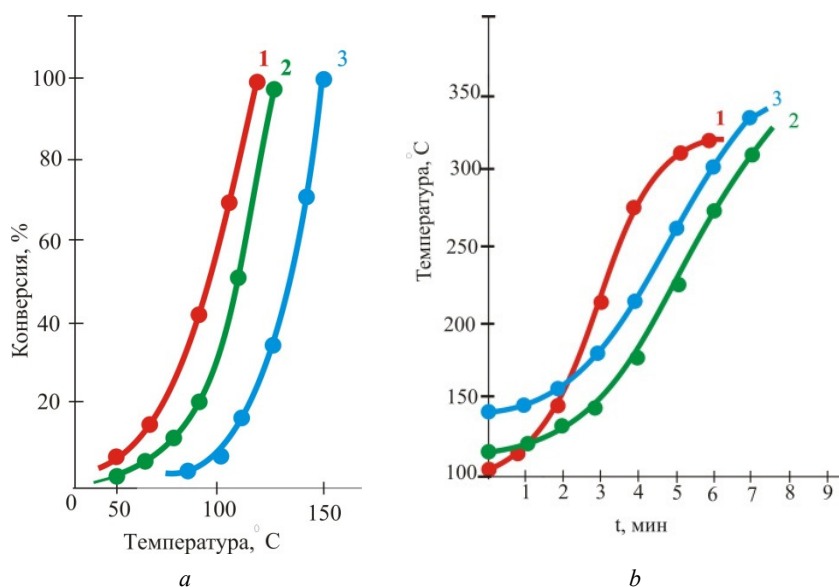


Рис. 4. Зависимость конверсии монооксида углерода от температуры (а) и кривые повышения температуры в ходе реакции окисления CO (b) на катализаторах: 1 – Cu–Mn = 2 : 1; 2 – Cu–Mn = 1 : 1; 3 – Co–Mn = 1 : 1

Fig. 4. Carbon monoxide conversion dependence on temperature (a) and temperature rise curves during the CO oxidation reaction (b) on catalysts: 1 – Cu–Mn = 2 : 1; 2 – Cu–Mn = 1 : 1; 3 – Co–Mn = 1 : 1

Системы Cu–Mn с соотношением 1 : 1 и 2 : 1 могут проводить реакцию окисления монооксида углерода при еще более низких температурах. Так, на катализаторе Cu–Mn = 1 : 1 100 %-ная конверсия монооксида углерода была достигнута при температуре 120 °C , а на катализаторе с соотношением Cu–Mn = 2 : 1 – при 110 °C . На всех катализаторах полная конверсия монооксида углерода достигается в начальные 4–5 мин реакции (рис. 4, б). Каталитическая система Cu–Mn = 2 : 1 была получена двумя способами: горением геля и раствора. Результаты показали, что катализатор, полученный обоими способами, активен при низких температурах. В присутствии бинарной системы Co–Cu, состоящей только из оксидов кобальта и меди, оксид углерода полностью превращается в диоксид при температуре 180 °C . Как было отмечено в экспериментальной части, при приготовлении катализаторов полученный после горения порошок смешивали с гидrogелем оксида алюминия (в качестве связующего), гранулировали и прокаливали.

Для сокращения времени синтеза катализатора на примере каталитической системы Cu–Mn = 2 : 1 исследована возможность получения ее в одну стадию, т. е. приготовленный золь нитратов металлов с лимонной кислотой смешивали с гидrogелем алюминия, формовали гранулы, которые сушили сначала в сушильном шкафу, а затем прокаливали в муфельной печи при температуре 600 °C . Полученный в одну стадию катализатор проявил такую же активность, как и катализатор, который получили смешиванием после горения порошка с алюмогелем. Активность многокомпонентных катализаторов зависит от многих факторов: химического и фазового составов, структуры, дисперсности, удельной поверхности, наличия в структуре дефектов, которые связаны с условиями синтеза катализатора.

Результаты проведенных экспериментов показали, что синтезированные нами золь-гель методом с горением бинарные оксиды, содержащие оксидную и манганит-шпинельную фазы,

более активны в низкотемпературном окислении CO, чем полученные этим методом индивидуальные оксиды. Известно, что твердые вещества с дефектной поверхностью обладают более высокой каталитической и адсорбционной активностью по сравнению со структурой совершенного кристалла. Поэтому используя различные методы синтеза, можно повысить дефектность внешней поверхности кристаллов. С этой точки зрения золь-гель метод с горением весьма привлекательный и его можно рассматривать как разновидность СВС (самораспространяющийся высокотемпературный синтез) метода, но протекающего при более низких температурах. Горение возникает при кратковременном тепловом воздействии на систему, в которой возбуждается экзотермическая реакция и дальнейшее горение происходит за счет собственного тепловыделения. При этом происходят различные физико-химические превращения – плавление, химическая реакция, диффузия, которые влияют на формирование состава и структуры, текстурные параметры системы. В табл. 2 представлены текстурные параметры синтезированных катализаторов, на рис. 5 микрофотографии Cu–Mn (1) и Co–Mn (2) оксидных систем.

Т а б л и ц а 2. Текстурные параметры синтезированных катализаторов

T a b l e 2. Texture parameters of the synthesized catalysts

Катализатор	Удельная поверхность, м ² /г	Объем пор, см ³ /г
Co ₃ O ₄	4,8	
CuO	3,0	
Co–Mn = 1 : 1	20,1	0,039 ($R \leq 19,4$ нм)
Co–Cu = 1 : 1	20,7	0,157 ($R \leq 19,4$ нм)
Cu–Mn = 1 : 1	9,6	0,012 ($R \leq 19,4$ нм)
Cu–Mn = 2 : 1	9,5	0,011 ($R \leq 19,4$ нм)
Cu–Mn = 2 : 1 (горение раствора)	16,3	0,082 ($R \leq 19,4$ нм)

Как видно из табл. 2, удельная поверхность оксидов меньше, чем двойных оксидов. В двойных оксидах в основном присутствуют поры с радиусом меньше 19,4 нм и объемом приблизительно одного порядка. Из электронно-микроскопических снимков образцов Cu–Mn и Co–Mn (рис. 5) видно, что в результате золь-гель горения образуются кристаллиты разного размера, причем преобладают наноразмерные частицы, а также их агломераты.

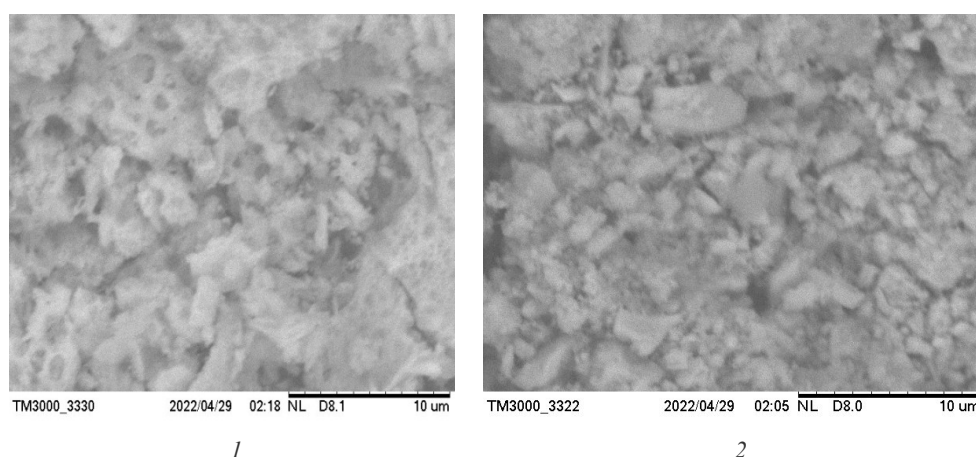


Рис. 5. Микрофотографии Cu–Mn (1) и Co–Mn (2) оксидных систем, полученных золь-гель методом с горением
Fig. 5. Microphotographs of Cu–Mn (1) and Co–Mn (2) oxide systems produced by the sol-gel combustion method

Так как синтезированные бинарные катализаторы являются многофазными оксидными системами переменного состава, для них возможно наличие всех видов дефектов твердых тел: точечные, протяженные (дислокации), электронные, представляющие локальные нарушения рас-

пределения зарядов [26]. Помимо этого, при наличии в составе синтезированных Co–Mn и Cu–Mn катализаторов оксидных и шпинельных фаз поверхностный кислород может координировать с разными атомами металлов структуры, проявляя тем самым разную реакционную способность. Шпинели в идеальной структуре кристаллизуются в кубической пространственной группе Fd-3m. В плотноупакованной решетке различают два типа пустот: тетраэдрические, ограниченные четырьмя кислородными анионами, и октаэдрические, ограниченные шестью кислородными анионами. Элементарная ячейка шпинели содержит 32 аниона кислорода, образующих 64 тетраэдрических (катионами металла занято 8) и 32 октаэдрических положения (катионами металла занято 16). В шпинелях переходные металлы могут размещаться в тетраэдрических и октаэдрических позициях. На основании большого количества теоретических и экспериментальных работ катионы по их склонности к занятию окта-пор располагаются в следующий ряд (при $*T = 0$): Cr^{3+} , Ni^{2+} , Mn^{3+} , Cu^{2+} , Al^{3+} , Cu^{+} , Fe^{2+} , Co^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} . Катионы слева до Al^{3+} больше склонны к занятию октаэдрических пор, а катионы от Al^{3+} до Fe^{2+} могут занимать как тетра-, так и окта-поры [26]. Размещение ионов переходных металлов в октаэдрических вакансиях приводит к тому, что энергия связи Me–O уменьшается, это способствует более легкому электронному переходу и тем самым повышению скорости протекания реакции окисления, с чем, по-видимому, связана и более высокая активность синтезированных двойных систем по сравнению с индивидуальными оксидами.

В исследуемых катализаторах так называемым активным оксо-центром может служить как «решеточный» кислород, так и кислород, адсорбированный на поверхности металла или оксида в атомарной или молекулярной форме. И в зависимости от этого реакция может протекать как в одну стадию (механизм Ленгмюра–Хиншельвуда), так и в две стадии (механизм Марса–ван-Кревелена) [21]. В первом случае адсорбированный на катализаторе монооксид углерода реагирует с адсорбированным кислородом (слитный механизм). По механизму Марса–ван-Кревелена CO первоначально окисляется кислородом внешней решетки катализатора, в результате чего образуется кислородная вакансия, затем происходит повторное окисление шпинели кислородом из газовой фазы, т. е. активной формой кислорода является решеточный кислород и во время реакции происходит попеременное восстановление и окисление катализатора.

Для выяснения этого вопроса на Cu–Mn-катализаторе были проведены специальные опыты. Сначала реакцию окисления CO на катализаторе проводили в отсутствие воздуха; затем поверхность катализатора предварительно очищали инертным газом при температуре реакции, а затем реакцию проводили без доступа воздуха. В третьем варианте опытов после очистки катализатора инертным газом реакцию проводили в атмосфере инертного газа путем добавления в реакционную среду монооксида углерода. Результаты показали, что во всех экспериментах наблюдалась незначительная конверсия монооксида углерода, о чем свидетельствует повышение температуры реакции на 12–15 °C в течение первых 3 мин. Затем температура очень медленно падает до начальной температуры, что указывает на прекращение реакции. Только при введении воздуха в реакционную среду реакция начинает протекать интенсивно, и в течение 5–7 мин конверсия монооксида достигает 100 %. Эти опыты подтверждают предположение о протекании реакции по механизму Ленгмюра–Хиншельвуда.

Результаты проведенных исследований показывают возможность получения активных многокомпонентных оксидных катализаторов технологически простым способом – золь-гель методом с горением. Формирование многофазных систем, включающим оксидные и шпинельные фазы при горении геля без дополнительной термической обработки, является доказательным преимуществом данного метода синтеза активных катализаторов для низкотемпературного окисления монооксида углерода в диоксид.

Заключение. Золь-гель методом с горением синтезированы каталитические системы на основе оксидов кобальта, меди и марганца для реакции низкотемпературного окисления монооксида углерода в диоксид углерода. Установлено, что полученные золь-гель методом с горением кобальт-марганцевые и медь-марганцевые оксидные системы активны в реакции низкотемпературного окисления (110–140 °C) монооксида углерода в диоксид. Рентгенофазовым анализом установлено, что бинарные оксидные системы Co–Mn и Cu–Mn, полученные золь-гель методом

с горением, являются многофазными системами, содержащими манганиты кобальта, меди и оксиды этих металлов. Осуществлен одностадийный синтез каталитической системы Cu–Mn/Al₂O₃ золь-гель методом с горением совместно с гидрогелем оксида алюминия прекурсоров и определена ее высокая активность в низкотемпературной конверсии монооксида углерода.

Список использованных источников

- Royer, S. Catalytic oxidation of carbon monoxide over transition metal oxides / S. Royer, D. Duprez // *Chem. Cat. Chem.* – 2011. – Vol. 3, N 1. – P. 24–65. <https://doi.org/10.1002/cctc.201000378>
- Nanocatalysts for Low-Temperature Oxidation of CO: Review / G. G. Xanthopoulou [et al.] // *Eurasian Chem.-Technol. J.* – 2015. – Vol. 17. – P. 17–32.
- Soliman, N. K. Factors affecting CO oxidation reaction over nanosized materials: A review / N. K. Soliman // *J. Mat. Res. Technol.* – 2019. – Vol. 8, N 2. – P. 2395–2407. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.12.012>
- Dey, S. Selection of Manganese oxide catalysts for catalytic oxidation of Carbon monoxide at ambient conditions / S. Dey, N. S. Mehta // *Res., Environ. Sustainability.* – 2020. – Vol. 1. – P. 100003. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2020.100003>
- Mahammadunnisa, S. NiO/Ce_{1-x}Ni_xO^{2-δ} as an alternative to noble metal catalysts for CO oxidation / S. Mahammadunnisa, M. K. Reddy, N. Lingaiah // *Catal. Sci. Technol.* – 2013. – N 3. – P. 730–736. <https://doi.org/10.1039/C2CY20641B>
- Prasad, R. A Review on CO Oxidation Over Copper Chromite Catalyst / R. Prasad, P. Singh // *Catal. Reviews: Science and Engineering.* – 2012. – Vol. 54, iss. 2. – P. 224–279. <https://doi.org/10.1080/01614940.2012.648494>
- Aniz, C. U. A study on catalysis by ferrosinels for preventing atmospheric pollution from carbon monoxide / C. U. Aniz, T. D. R. Nair // *Open J. Phys. Chem.* – 2011. – Vol. 1, N 3. – P. 124–130. <https://doi.org/10.4236/ojpc.2011.13017>
- Молчанов, В. В. Влияние механохимической активации на каталитические свойства ферритов со структурой шпинели / В. В. Молчанов, Р. А. Буянов, Ю. Т. Павлюхин // *Кинетика и катализ.* – 2003. – Т. 44, № 6. – С. 860–864. <https://doi.org/10.1023/B:KICA.0000009055.02997.9c>
- Nanosized copper ferrite materials: mechanochemical synthesis and characterization / E. Manova [et al.] // *J. Solid State Chem.* – 2011. – Vol. 184, iss. 5. – P. 1153–1158. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2011.03.035>
- Томина, Е. В. Микроволновый синтез ортоферрита иттрия и допирование его никелем / Е. В. Томина, Н. А. Куркин, С. А. Мальцев // *Конденсированные среды и межфазные границы.* – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 306–312. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2019.21/768>
- Микроволновый синтез ферритов (Co, Ni, Cu, Zn) / Ю. Н. Литвишков [и др.] // *Журн. прикл. химии.* – 2018. – Т. 91, № 5. – С. 679–687.
- Рахманкулов, Д. Л. Микроволновое излучение и интенсификация химических процессов / Д. Л. Рахманкулов, И. Х. Бикбулатов. – М.: Химия, 2003. – 220 с.
- Ванецев, А. С. Микроволновой синтез индивидуальных и многокомпонентных оксидов / А. С. Ванецев, Ю. Д. Третьяков // *Успехи химии.* – 2007. – Т. 76, № 5. – С. 435–453.
- Yen-Chun, Liu. Magnetic and catalytic properties of copper ferrite nanopowders prepared by a microwave-induced combustion process / Yen-Chun Liu, Yen-Pei Fu // *Ceram. Int.* – 2010. – Vol. 36, iss. 5. – P. 1597–1601. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.02.032>
- Catalytic activity of copper ferrite synthesized with the using of microwave treatment in the oxidation reaction of carbon monoxide / G. R. Azimova [et al.] // *Am. J. Clin. Nutr.* – 2020. – Vol. 2. – P. 29–35.
- Bushkova, V. S. Synthesis and study of the properties of nanoferrites obtained by the sol-gel method with the participation of auto-combustion / V. S. Bushkova // *J. Nano- and Electronic Physics.* – 2015. – Vol. 7, N 1. – P. 01023–01029.
- Structural parameters and magnetic properties of copper ferrite nanopowders obtained by the sol-gel combustion / V. A. Zhuravlev [et al.] // *J. Alloys Compd.* – 2016. – Vol. 692. – P. 705–712. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.09.069>
- Sol-gel auto combustion synthesis and characterizations of cobalt ferrite nanoparticles: Different fuels approach / V. R. Bhagwata [et al.] // *Mater. Sci. Eng.* – 2019. – Vol. 248. – P. 11438. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2019.114388>
- Synthesis of cobalt ferrite (CoFe₂O₄) by combustion with different concentrations of glycine / C. G. Kaufmann [et al.] // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2019. – Vol. 659. – P. 012079. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/659/1/012079>
- Synthesis and characterization of nickel ferrite nanoparticles by sol-gel auto combustion method / R. Kesavamoorthi [et al.] // *J. Chem. Pharm. Sci.* – 2016. – Vol. 9, N 1. – P. 160–162.
- Dey, S. Catalytic conversion of carbon monoxide into carbon dioxide over spinel catalysts: An overview / S. Dey, G. Ch. Dhal // *Mater. Sci. Energy Technol.* – 2019. – Vol. 2, iss. 3. – P. 575–588. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.06.003>
- Copper based mixed oxide catalysts (CuMnCe, CuMnCo and CuCeZr) for the oxidation of CO at low temperature / S. Dey [et al.] // *Mater. Discovery.* – 2017. – Vol. 10. – P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.md.2018.02.001>
- Effect of preparation conditions on the catalytic activity of CuMnOx catalysts for CO Oxidation / S. Dey [et al.] // *Bull. Chem. Reaction Eng. Catal.* – 2017. – Vol. 12, N 3. – P. 1–15. <https://doi.org/10.9767/brec.12.3.900.437-451>
- Kinetics of catalytic oxidation of CO over copper-manganese oxide catalyst / M. Li [et al.] // *Separation and Purification Technology.* – 2007. – Vol. 57, iss. 1. – P. 147–151. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.03.016>
- Pillai, U. R. Room temperature oxidation of carbon monoxide over copper oxide catalyst / U. R. Pillai, S. Deevi // *Applied Catalysis B: Environmental.* – 2006. – Vol. 64, N 1–2. – P. 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2005.11.005>
- Брусенцов, Ю. А. Основы физики и технологии оксидных полупроводников / Ю. А. Брусенцов, А. М. Минаев. – Тамбов, 2002. – 80 с.

References

1. Royer S., Duprez D. Catalytic oxidation of carbon monoxide over transition metal oxides. *ChemCatChem.*, 2011, vol. 3, pp. 24–65. <https://doi.org/10.1002/cctc.201000378>
2. Xanthopoulou G. G., Novikova V. A., Knysha Yu. A., Amosova A. P. Nanocatalysts for Low-Temperature Oxidation of CO: Review. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 2015, vol. 17, pp. 17–32.
3. Soliman N. K. Factors affecting CO oxidation reaction over nanosized materials: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, vol. 8, no. 2, pp. 2395–2407. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.12.012>
4. Dey S., Mehta N. S. Selection of Manganese oxide catalysts for catalytic oxidation of Carbon monoxide at ambient conditions. *Resources, Environment and Sustainability*, 2020, vol. 1, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2020.100003>
5. Mahammadunnisa S., Reddy M. K., Lingaiah N. NiO/Ce_{1-x}Ni_xO^{2-δ} as an alternative to noble metal catalysts for CO oxidation. *Catalysis Science & Technology*, 2013, no. 3, pp. 730–736. <https://doi.org/10.1039/C2CY20641B>
6. Prasad R., Singh P. A Review on CO Oxidation Over Copper Chromite Catalyst. *Catalysis Reviews: Science and Engineering*, 2012, vol. 54, iss. 2, pp. 224–279. <https://doi.org/10.1080/01614940.2012.648494>
7. Aniz C. U., Nair T. D. R. A study on catalysis by ferrosinels for preventing atmospheric pollution from carbon monoxide. *Open Journal of Physical Chemistry*, 2011, vol. 1, no. 3, pp. 124–130. <https://doi.org/10.4236/ojpc.2011.13017>
8. Molchanov V. V., Buyanov R. A., Pavlyukhin Yu. T. Effect of Mechanochemical Activation on the Catalytic Properties of Ferrites with the Spinel Structure. *Kinetics and Catalysis*, 2003, vol. 44, no. 6, pp. 788–792. <https://doi.org/10.1023/B:KICA.0000009055.02997.9c>
9. Manova E., Tsoncheva T., Paneva D., Popova M., Velinov N., Kunev B., Tenchev K., Mitov I. Nanosized copper ferrite materials: mechanochemical synthesis and characterization. *Journal of Solid State Chemistry*, 2011, vol. 184, iss. 5, pp. 1153–1158. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2011.03.035>
10. Tomina E. V., Kurkin N. A., Mal'tsev S. A. Microwave synthesis of yttrium orthoferrite doped with nickel. *Kondensirovannye sredy i mezfaznye granicy = Condensed Matter and Interphases*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 306–312 (in Russian). <https://doi.org/10.17308/kcmf.2019.21/768>
11. Litvishkov Yu. N., Zul'fugarova S. M., Aleskerova Z. F., Gasangulieva N. M., Shakunova N. V., Aleskerov A. G. Microwave synthesis of Co, Ni, Cu, Zn ferrites. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2018, vol. 91, no. 5, pp. 793–801. <https://doi.org/10.1134/S1070427218050105>
12. Rakhmankulov D. L., Bikbulatov I. Kh. *Microwave radiation and intensification of chemical processes*. Moscow, Khimiya Publ., 2003. 220 p. (in Russian).
13. Vanetsev A. S., Tret'yakov Yu. D. Microwave-assisted synthesis of individual and multicomponent oxides. *Russian Chemical Reviews*, 2007, vol. 76, no. 5, pp. 397. <https://doi.org/10.1070/RC2007v076n05ABEH003650>
14. Yen-Chun Liu, Yen-Pei Fu. Magnetic and catalytic properties of copper ferrite nanopowders prepared by a microwave-induced combustion process. *Ceramics International*, 2010, vol. 36, iss. 5, pp. 1597–1601. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.02.032>
15. Azimova G. R., Zul'fugarova S. M., Aleskerova Z. F., Ismailov E. H. Catalytic activity of copper ferrite synthesized with the using of microwave treatment in the oxidation reaction of carbon monoxide. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2020, vol. 2, pp. 29–35.
16. Bushkova V. S. Synthesis and study of the properties of nanoferrites obtained by the sol-gel method with the participation of auto-combustion. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2015, vol. 7, no.1, pp. 01023–01029.
17. Zhuravlev V. A., Minin R. V., Itin V. I., Lilenko I. Yu. Structural parameters and magnetic properties of copper ferrite nanopowders obtained by the sol-gel combustion. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, vol. 692, pp. 705–712. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.09.069>
18. Bhagwata V. R., Ashok V. Humbeb, Morec S. D., Jadhav K. M. Sol-gel auto combustion synthesis and characterizations of cobalt ferritenanoparticles: Different fuels approach. *Materials Science & Engineering*, 2019, vol. 248, p. 11438. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2019.114388>
19. Kaufmann C. G., Zampiva R. Y. S., Alves A. K., Bergmann C. P., Giorgini L. Synthesis of cobalt ferrite (CoFe₂O₄) by combustion with different concentrations of glycine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 659, p. 012079. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/659/1/012079>
20. Kesavamoorthi R., Vigneshwaran A. N., Vijayalakshmi Sanyal, C. Ramachandra Raja. Synthesis and characterization of nickel ferrite nanoparticles by sol-gel auto combustion method. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 2016, vol. 9, no. 1, pp. 160–162.
21. Dey S., Dhal G. Ch. Catalytic conversion of carbon monoxide into carbon dioxide over spinel catalysts: An overview. *Materials Science for Energy Technologies*, 2019, vol. 2, iss. 3, pp. 575–588. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.06.003>
22. Dey S., Dhal G. C., Mohan D., Prasad R. Copper based mixed oxide catalysts (CuMnCe, CuMnCo and CuCeZr) for the oxidation of CO at low temperature. *Materials Discovery*. 2017, vol. 10, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.md.2018.02.001>
23. Dey S., Dhal G. C., Mohan D., Prasad R. Effect of preparation conditions on the catalytic activity of CuMnOx catalysts for CO Oxidation. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 2017, vol. 12, no. 3, pp. 1–15. <https://doi.org/10.9767/bcrec.12.3.900.437-451>
24. Li M., Wang D.-H., Shi X.-C., Zhang Z.-T., Dong T.-X. Kinetics of catalytic oxidation of CO over copper-manganese oxide catalyst. *Separation and Purification Technology*, 2007, vol. 57, iss. 1, pp. 147–151. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.03.016>

25. Pillai U. R., Deevi S. Room temperature oxidation of carbon monoxide over copper oxide catalyst. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2006, vol. 64, no. 1–2, pp. 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2005.11.005>

26. Brusentsov Yu. A., Minaev A. M. *Fundamentals of physics and technology of oxide semiconductors*. Tambov, 2002. 80 p. (in Russian).

Информация об авторах

Зульфугарова Сима Мамед гызы – канд. хим. наук, зав. лаб. Институт катализа и неорганической химии НАН Азербайджана (пр. Г. Джавида, 113, AZ1143, Баку, Азербайджанская Республика). E-mail: zsm07@mail.ru

Азимова Гюнель Рамиз гызы – науч. сотрудник. Институт катализа и неорганической химии (пр. Г. Джавида, 113, AZ1043, Баку, Азербайджанская Республика). E-mail: ezimova2015@gmail.com

Алескерова Зулейха Фикрет гызы – науч. сотрудник. Институт катализа и неорганической химии (пр. Г. Джавида, 113, AZ1143, Баку, Азербайджанская Республика). E-mail: zuleyxaalasarova@gmail.com

Гусейнли Горхмаз Мансур оглы – канд. хим. наук, зав. лаб. Институт природных ресурсов Нахчыванского отделения наук НАН Азербайджана (пр. Г. Алиева, 35, AZ7000, Нахчыван, Азербайджанская Республика). E-mail: huseynli72@list.ru

Тагиев Дилгам Бабир оглы – академик НАН Азербайджана, д-р хим. наук, профессор, директор Института катализа и неорганической химии (пр. Г. Джавида, 113, AZ1143, Баку, Азербайджанская Республика). E-mail: dtagiyev@hotmail.com

Information about the authors

Zulfugarova Sima Mamed – Ph. D. (Chemistry), Head of the Laboratory. Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry (113, H. Javid Ave., AZ1143, Baku, Azerbaijan Republic). E-mail: zsm07@mail.ru

Azimova Gunel Ramiz – Researcher. Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry (113, H. Javid Ave., AZ1143, Baku, Azerbaijan Republic). E-mail: ezimova2015@gmail.com

Aleskeroiva Zuleyxa Fikret – Researcher. Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry (113, H. Javid Ave., AZ1143, Baku, Azerbaijan Republic). E-mail: zuleyxaalasarova@gmail.com

Guseynli Gorkhmaz Mansur – Ph. D. (Chemistry), Head of the Laboratory. Institute of Natural Resources (35, G. Aliyev Ave., AZ7000, Nakhchivan, Azerbaijan Republic). E-mail: huseynli72@list.ru

Tagiyev Dilgam Babir – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor. Director of the Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry (113, H. Javid Ave., AZ1143, Baku, Azerbaijan Republic). E-mail: dtagiyev@hotmail.com