

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИИ (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 9.035
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

SOI: [1.1/TAS](#) DOI: [10.15863/TAS](#)

International Scientific Journal Theoretical & Applied Science

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2021 Issue: 11 Volume: 103

Published: 28.11.2021 <http://T-Science.org>

QR – Issue



QR – Article



Khayot Khurmatovich Yuldashev

Fergana Polytechnic Institute

basic doctoral Candidate, department of chemical technology, Fergana, Uzbekistan

Eliderlegioner@gmail.com

Yulbarsxon Nabievich Mansurov

Tashkent State Transport University

doctor of technical sciences, professor, Tashkent, Uzbekistan

yulbarsmans@gmail.com

Abdulaziz Ikhomjon ugli Jurayev

Fergana Polytechnic Institute

assistant, department of chemical technology, Fergana, Uzbekistan

abdulazizjurayev8209@gmail.com

Navruzbek Abdullayevich Mirzayev

Fergana Polytechnic Institute

assistant, department of chemical technology, Fergana, Uzbekistan

n.mirzayev@ferpi.uz

MODERN CATALYST BASED ON CERIUM OXIDE

Abstract: Air pollution with harmful gases such as carbon monoxide, nitrogen oxides, and hydrocarbons leads to a serious deterioration in human health, while atmospheric pollution with hydrocarbons can lead to a significant increase in global warming processes, since hydrocarbons, and primarily methane, are effective greenhouse gases. By virtue of these circumstances, the problem of creating effective catalysts for the purification of fuel combustion products not only does not lose its relevance but also becomes increasingly acute. Cerium dioxide is now widely used on modern three-function catalytic systems (TWC). The article provides a literature review of the physicochemical properties of cerium dioxide, the mechanism of oxidation of carbon monoxide in cerium oxide, as well as the catalytic properties of cerium dioxide.

Key words: catalysis, carbon monoxide, cerium dioxide, Mars - Van Krevelen mechanism, TWC, OSC, rare earth elements.

Language: Russian

Citation: Yuldashev, Kh. Kh., Mansurov, Y. N., Jurayev, A. I., & Mirzayev, N. A. (2021). Modern catalyst based on cerium oxide. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 11 (103), 940-947.

Soi: <http://s-o-i.org/1.1/TAS-11-103-112> **Doi:**  <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2021.11.103.112>

Scopus ASCC: 1600.

СОВРЕМЕННЫЕ КАТАЛИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦЕРИЯ

Аннотация: Загрязнение воздуха вредными газами как окись углерода, оксиды азота и углеводороды приводит к серьезному ухудшению здоровья людей, в то время как загрязнение атмосферы углеводородами может приводить к значительному усилению процессов глобального потепления, поскольку углеводороды и в первую очередь метан являются эффективными парниковыми газами. В силу указанных обстоятельств проблема создания эффективных катализаторов очистки продуктов сгорания топлив не только не теряет своей актуальности, но и приобретает все возрастающую остроту. В настоящее время на современных трехфункциональных каталитических системах (TWC) широко используется диоксид церия. В статье

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 1.582	РИИЦ (Russia) = 3.939	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 9.035	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 7.184	OAJI (USA) = 0.350

приводится литературный обзор физико-химических свойств диоксида церия, механизм окисления монооксида углерода в оксиде церия, а также каталитические свойства диоксида церия.

Ключевые слова: катализ, окись углерода, диоксид церия, механизм Марса – Ван Кревелена, TWC, OSC, редкоземельные элементы.

Введение

УДК 541.128 : 546.655

Учитывая стремительный рост количество автомобилей, количество вредных веществ в городской атмосфере увеличивается. Численность мирового парка автомобилей в 2015 году по данным исследований Международной организации производителей автомобилей (OICA, Organization Internationale des Constructeurs d'Automobiles, Париж) составило 947 миллионов легковых и 335 миллионов коммерческих автомобилей [1]. Подавляющая часть автомобилей имеет двигатели внутреннего сгорания, работающие на бензине. При работе таких моторов в воздух попадает большое количество продуктов неполного сгорания топлива, в том числе окись углерода.

Согласно источнику [2,3] один автомобиль в год поглощает из атмосферы в среднем более 4 т кислорода, выбрасывая при этом с отработавшими газами примерно 800 кг угарного газа (CO) и 40 кг оксидов азота (NO_x).

В последние годы в связи с быстрым развитием автомобильного транспорта существенно обострились проблемы воздействия его на окружающую среду. Автомобили, работающие на ДВС, сжигают огромное количество нефтепродуктов и природного газа, нанося при этом ощутимый вред окружающей среде, главным образом атмосфере. Поскольку основная масса автомобилей сконцентрирована в крупных городах, воздух этих городов не только обедняется кислородом, но и загрязняется вредными компонентами отработавших газов. По этой же причине увеличивается риск воздействия вредных веществ выхлопных газов на здоровье человека. Особенно это заметно в крупных городах промышленно развитых стран, что является причиной таких заболеваний, как хронический бронхит, астма, эмфизема легких, сердечнососудистых, раковых и др [3]. Чрезмерное воздействие CO может приводить к изменению функционирования систем иммунитета, а, возможно, и к гибели иммунокомпетентных клеток [4].

С 1972 года в США и с 1989 года в Европе в автомобильной промышленности были введены правила, ограничивающие загрязнение воздуха,

выбрасываемое транспортными средствами. С тех пор законодательство регулярно подкреплялось все более строгими правилами, касающимися четырех категорий загрязняющих веществ: монооксида углерода, углеводородов (и других органических веществ), оксидов азота (NO_x) и твердых частиц сажи [5].

Состав автомобильных выхлопных газов

Основными токсичными компонентами выхлопных газов ДВС являются оксиды углерода, азота и углеводороды. Кроме того, с выхлопными газами в атмосферу поступают предельные и непредельные углеводороды, альдегиды, канцерогенные вещества, сажа и другие компоненты. Состав выхлопных газов двигателей зависит от множества факторов, таких как: тип двигателя (двух- или четырехтактный, с искровым или компрессионным (дизельным) зажиганием), условия движения, например городской или загородный, скорость транспортного средства, ускорение / замедление и т.д. [6]. В таблице 1 приведены типичные составы выхлопных газов для некоторых распространенных типов двигателей.

На сегодняшний момент приоритетным методом детоксикации выхлопных газов автотранспорта является каталитическая очистка. Первые работы по каталитическим очисткам начались в 1920 году [7]. Когда были опубликованы результаты ранних исследований смога в Лос-Анджелесе, французский изобретатель Eugene Houdry заинтересовался ролью выхлопных газов из дымовых труб и автомобильных выхлопов в загрязнении воздуха и основал компанию Oxy-Catalyst. Houdry первым разработал каталитические преобразователи для дымовых труб, сокращенно названные "cats" [8] и в первые получил патент на каталитический нейтрализатор (US Patent 2,674,521: Catalytic converter for exhaust gases) в 1954 году [9]. У Houdry был опыт работы инженером-механиком в нефтеперерабатывающей промышленности, и именно в этой области он научился очищать выхлопные газы из дымовой трубы. Вскоре его открытия стали широко использоваться в других малолитражных транспортных средствах, особенно в автомобилях [9].

Impact Factor:	ISRA (India) = 6.317	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
	ISI (Dubai, UAE) = 1.582	РИИЦ (Russia) = 3.939	PIF (India) = 1.940
	GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 9.035	IBI (India) = 4.260
	JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 7.184	OAJI (USA) = 0.350

Таблица 1. Пример условий выхлопа для двух- и четырехтактных, дизельных и обедненных четырехтактных двигателей [6].

Компоненты выхлопной системы и условия ¹	Дизельный двигатель	Четырехтактный двигатель с искровым зажиганием	Четырехтактный двигатель с искровым зажиганием на обедненной смеси	Двухтактный двигатель с искровым зажиганием
NO _x	350 – 1000 ppm	100 – 4000 ppm	≈1200 ppm	100 – 200 ppm
HC	50 – 330 ppm C	500 – 5000 ppm C	≈ 1300 ppm C	20,000 – 30,000 ppm C
CO	300 – 1200 ppm	0,1 – 6%	≈ 1300 ppm	1 – 3%
O ₂	10 – 15%	0,2 – 2%	4 – 12%	0,2 – 2%
H ₂ O	1,4 – 7%	10 – 12%	12%	10 – 12%
CO ₂	7%	10 – 13,5%	11%	10 – 13%
SO _x	10 – 100 ppm ²	15 – 60 ppm	20 ppm	≈20 ppm
Твердые частицы	65 mg/m ³			
Температуры (цикл испытаний)	650°C (420°C)	1100°C ³	850°C	1000°C
Часовая объемная скорость газа (ч ⁻¹)	30,000 – 100,000	30,000 – 100,000	30,000 – 100,000	30,000 – 100,000

Примечание: ¹остальное N₂; ²для сравнения: дизельное топливо с содержанием серы 500 ppm производит около 20 ppm SO₂; ³комбинированный катализатор.

В последнее время исследователями все больше проявляется интерес к диоксиду церия, как промотирующей добавки в катализаторы окисления CO. Коммерческая доступность, высокая каталитическая активность CeO₂ и, собственно, улучшение свойств сложных катализаторов при добавлении этого оксида обеспечивают перспективы дальнейшего расширения области применения систем на основе диоксида церия в промышленности [21].

Физико-химические свойства оксида церия

Из всех редкоземельных элементов церий (Ce) является наиболее используемый в области

катализа. Церий – самый распространенный редкоземельный элемент, составляющий около 0,0046% от веса земной коры (64 ppm), что даже больше, чем медь (60 ppm). [10,11] Он содержится в ряде минералов, монацит (Ce, La)PO₄, бастназит Ce[CO₃] (OH, F), паризит Ca(Ce, La)₂[CO₃]₃F₂, ортит (Ca, Ce)₂(Al, Fe)₃Si₃O₁₂(O, OH), лопарит (Na, Ca, Ce)(Ti, Nb)₂O₆, эшинит (Ce, Ca, Th)(Ti, Nb)₂O₆ [12] и церианит [13]. Высокое содержание церия и его выдающаяся каталитическая активность являются одной из причин, по которым церий является элементом, применяемым в системах каталитической конверсии выхлопных газов автомобилей в промышленности [10,12].

Таблица 2. Основные физико-химические свойства диоксида церия [13]

№	Свойство	Ед. изм	Значение
1	Молекулярный вес		172,12
2	Твердость по минералогической шкале		6
3	Ионный радиус Ce ⁴⁺	Å	0,88; 0,92; 0,94
4	Потенциал ионизации	эВ	5,47
5	Температура плавления	°C	2400
6	Плотность	г/см ³	7,132
7	Теплота образования	кДж/моль	ΔH _{f,298} = – 1090,35
8	Теплоемкость при постоянном давлении	Дж/моль·К	C _{p,298} ⁰ = 61,63

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
 ISI (Dubai, UAE) = 1.582
 GIF (Australia) = 0.564
 JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
 ПИИЦ (Russia) = 3.939
 ESJI (KZ) = 9.035
 SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
 PIF (India) = 1.940
 IBI (India) = 4.260
 OAJI (USA) = 0.350

9	Энергия Гиббса образования	кДж/моль	$\Delta G_{f,298}^0 = -1026,5$
10	Стандартная энтропия	Дж/моль·К	$S_{298}^0 = 62,30$
11	Электронная конфигурация церия		$4f^2 5d^0 6s^2$

Диоксид церия (CeO_2) – белый плотный кристаллический порошок с желтоватым оттенком. Белый цвет двуокиси, является следствием содержащихся в ней примесей. Часто CeO_2 бывает окрашен в цвет от желтого до темно-оранжевого, который усиливается при нагревании из-за присутствия следов празеодима или от окрашенных полиморфных форм [13,14]. Различные оттенки окраски двуокиси церия так же объясняются наличием различных примесей: неодима, железа и др. [13,15].

Церий, обладающий электронной конфигурацией $4f^2 5d^0 6s^2$, может находиться в двух степенях окисления +3 и +4 и образует с кислородом два основных соединения фиксированного состава (CeO_2 и Ce_2O_3) [14], ряд промежуточных соединений ($\text{Ce}_{11}\text{O}_{20}$, Ce_9O_{16} и Ce_7O_{12}), а также фазы переменного состава [16].

Диоксид церия имеет кубическую гранецентрированную решетку (структурный тип

флюорита, пространственная группа Fm3m) [13,14,17] с параметром элементарной ячейки $a=5,411\text{Å}$, на ячейку приходится 4 формальных единицы. В этой структуре каждый катион церия окружен восемью ближайшими эквивалентными кислородными анионами, а каждый анион тетраэдрически координирован 4 катионами.

Стехиометрия оксида церия зависит от температуры и давления кислорода. Термодинамические расчеты показывают, что металлический церий нестабилен в присутствии кислорода и легко окисляется до Ce_2O_3 и CeO_2 . Фактически, удаление кислорода из церия при воздействии атмосферы с дефицитом O_2 при высоких температурах приводит к образованию нескольких фаз оксида церия типа CeO_{2-x} с диапазоном возможных составов ($0 \leq x \leq 0,5$) [18,19].

Таблица 3. Некоторые термодинамические данные для оксидов церия [14]

Реакция	ΔH_{298}^0 , кДж/моль	ΔG_{298}^0 , кДж/моль	S_{298}^0 , Дж/моль
$\text{Ce} + \text{O}_2 = \text{CeO}_2$	-1089	-1025	61,5
$2\text{Ce} + 1,5\text{O}_2 = \text{Ce}_2\text{O}_3$	-1796	-1708	152
$\text{CeO}_{1,5} + 0,25\text{O}_2 = \text{CeO}_2$	-191	-172	-

Довольно высокая теплота образования, которая при 298К составляет – 1090,35 кДж/моль [14], обуславливает значительную устойчивость двуокиси церия. Водородом она восстанавливается лишь при высокой температуре (около 1250°C) с образованием Ce_2O_3 [15,20]. Восстановление не идет глубже, чем до Ce_2O_3 , даже при давлении водорода до 150 атмосфер при 2500°C. При осторожном восстановлении CeO_2 , в токе водорода при температурах около 1000°C образуется в виде красивых темно-синих иголок промежуточный окисел состава Ce_4O_7 . Восстановление двуокиси церия водородом до металла наблюдается лишь в присутствии металлического никеля при температуре 1380°C. При действии углерода в условиях электропечи она восстанавливается до Ce_2O_3 , который при дальнейшем действии углерода превращается в карбид церия. До полуторной окиси двуокись церия восстанавливается при осторожном восстановлении металлическим кальцием [15].

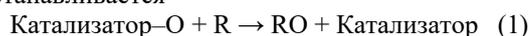
Механизм окисления СО на диоксиде церия

Чтобы определить факторы, которые влияют на активность окисления СО, необходимо понять

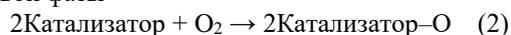
механизм реакции окисления СО. В работах [22] сообщалось, что окисление СО на оксиде церия происходит по механизму Марса – Ван Кревелена.

В 1954 г. П. Марс и Д. Ван Кревелен в своих исследованиях кинетики каталитического окисления показали, что в большинстве случаев окисление протекает по стадийному механизму попеременного окисления и восстановления катализатора. Например, реакцию окисления углеводорода R можно описать из двух стадий [7]:

1. Реакция между катализатором в окисленном состоянии Катализатор–О и углеводородом R, в которой оксид восстанавливается



2. Повторное окисление (реокисление) восстановленного катализатора кислородом газовой фазы



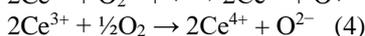
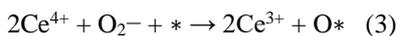
В случае катализаторов на основе оксида церия, поскольку восстанавливаемый оксид оксида церия может также обеспечивать адсорбированные формы кислорода, которые могут перетекать с носителя на частицы металла, а восстановленный Ce^{3+} впоследствии повторно окисляется газообразным кислородом [23]:

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

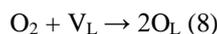
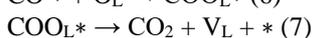
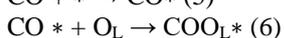
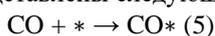
SIS (USA) = 0.912
ПИИЦ (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 9.035
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350



В стационарном состоянии скорости обеих стадий должны быть равны. Строго говоря, модель Марса – Ван Кревелена не содержит каких-либо предположений о форме активного кислорода катализатора [7].

Согласно данному механизму окись церия участвует в окислительно-восстановительном цикле, в начальной стадии которого происходит восстановление CeO_2 под действием CO , с последующим окислением восстановленных фаз под действием кислорода газовой смеси. Основные стадии этого процесса могут быть представлены следующими уравнениями:



Здесь «*» обозначает участки адсорбции на поверхности, а символ стоящий рядом с соединением указывает на то, что оно находится в адсорбированном состоянии. « O_L » и « V_L » обозначают кислород решетки и кислородные вакансии в оксиде церия соответственно. В уравнение (5) идет процесс адсорбции CO на поверхности оксида церия. Далее адсорбированный CO реагирует с кислородом решетки, приводящая к образованию промежуточных соединений (уравнение (6)). В уравнение (7) идет процесс десорбции промежуточных продуктов реакции с образованием CO_2 и кислородных вакансий, а места адсорбции обновляются. Одновременно кислород в газовой фазе активируется на катализаторе для пополнения кислородных вакансий (уравнение (8)).

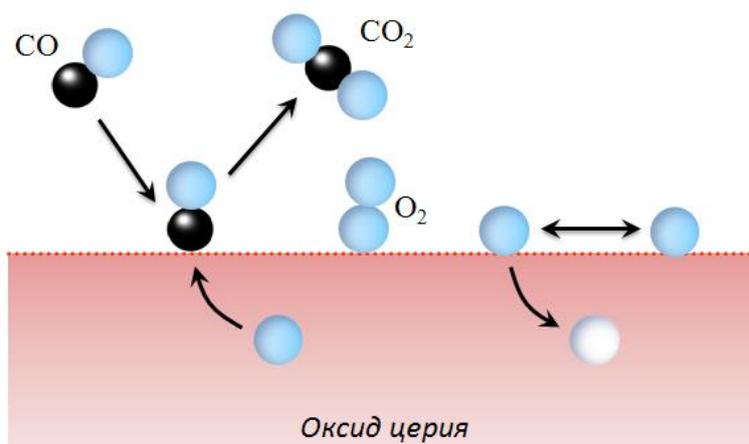


Рис.1. Реакция окисления CO на оксиде церия по механизму Марса – Ван Кревелена

Окисление CO на диоксиде церия не может быть лимитировано, ни адсорбцией CO/O_2 ни десорбцией CO_2 , а лимитирующей стадией процесса, является стадия экстракции кислорода решетки (уравнение (6)) [13].

Каталитические свойства диоксида церия

CeO_2 находит широкое применение в катализе, как в качестве носителя, так и в качестве промотирующей добавки в сложных катализаторах. Использование оксидов редкоземельных элементов (РЗЭ) как носителей катализаторов дает возможность повышать дисперсность активных центров, стабильность поверхностных структур и подвижность кислорода в реакции окисления CO [24].

Диоксид церия обладает всеми свойствами хорошего носителя, это – высокая температура плавления, термостойкость, реакционная способность в твердофазных реакциях и

доступность. Так же одним из свойств диоксида церия, которым не обладает большинство носителей, является то, что он термолюминисцентен при температуре $\geq 400^\circ\text{C}$. При этом излучаемая энергия может поглощаться молекулами реагентов, в результате чего скорость реакции может облегчаться или затрудняться [25].

Однако в области высоких температур CeO_2 нестабилен, что проявляется, прежде всего, в изменении его текстурных характеристик. При термической обработке (1000–1100К) удельная поверхность CeO_2 обычно понижается до нескольких $\text{m}^2/\text{г}$. Не менее важным фактором является стоимость CeO_2 , которая значительно выше стоимости таких носителей, как Al_2O_3 и SiO_2 . Поэтому CeO_2 используют в основном в комбинации с другими оксидами [19].

Однако наибольший интерес представляет применение CeO_2 в трехфункциональных катализаторах (TWC, three way catalyst). Диоксид

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИЦ (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 9.035
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

церия в TWC радикальным образом изменил характер прохождения процессов. Уникальная способность CeO_2 накапливать кислород в окислительной среде (OSC – oxygen storage capacity, кислородная емкость) за счет перехода Ce^{3+} в Ce^{4+} и высвобождать его для участия в реакциях в восстановительной среде путем обратного перехода Ce^{4+} в Ce^{3+} обеспечивает высокую конверсию токсикантов в обоих процессах, независимо от концентрации кислорода в газовой фазе [21].

Однако роль диоксида церия в TWC не ограничивается функцией OSC и связанной с ней способностью быстрой транспортировки кислорода. Одной из наиболее важных особенностей церийоксидсодержащих катализаторов TWC является высокая степень синергетического взаимодействия с благородными металлами, что обуславливает:

1. Возрастание скорости обмена между кислородом объема решетки и газовой фазы.
2. Увеличение дисперсности нанесенных благородных металлов.
3. Повышение термической стабильности носителя Al_2O_3 .
4. Увеличение степени окисления CO за счет кислорода решетки [21].

Для смешанных оксидных катализаторов в процессах окисления CO или совместной очистки от CO и NO_x добавление оксида церия к катализаторам увеличивает их каталитическую активность, особенно в области высокой температуры. Это объясняется тем, что присутствие оксида церия усиливает подвижность кислорода [24].

В работе [24] рассматривается влияние оксидов РЗЭ (в частности оксида церия) на снижение энергии активации и увеличении скорости окисления CO при низких температурах. Исследование структуры таких катализаторов методом статических магнитных измерений по Фарадею показали, что в присутствии РЗЭ упорядоченная кристаллическая структура оксидов переходных металлов практически не образуется, при этом происходит аморфизация активного компонента катализатора и образуются новые активные центры. Так катализаторы, содержащие Fe, Ce, нанесенные на оксид алюминия уже при температуре 220–230°C проявляли 100%-е превращение CO в CO_2 .

Изучение CeO_2 в качестве промотирующей добавки проводилось в сравнении с другими добавками, в первую очередь оксидами редкоземельных элементов, с целью повышения активности, адсорбционных свойств или стабильности системы. Было найдено, что промотирование оксидомедного катализатора, нанесенного на оксид алюминия, оксидами лантана и церия, понижает температуру 100%-ой

конверсии CO в реакции окисления, при этом действие добавки оксида церия более эффективно. Полученные катализаторы характеризовались высокой прочностью и устойчивостью в отношении отравления SO_2 и соединениями свинца [26].

Основной особенностью взаимодействия оксида церия с оксидами переходных металлов является проявление в ряде случаев эффекта синергизма каталитической активности, когда смешанные катализаторы оказываются значительно активнее исходных оксидов. Исследование окисления CO на оксидах РЗЭ и d-переходных металлах, выполненное в работах [26,27,28] показало, что для смешанных бинарных систем Ce–Co, Ce–Fe, Ce–Cu, Ce–Mn наблюдается эффект синергизма активности. Для бинарных оксидов Ce–Ni и Ce–Cr температура 100%-го окисления CO оказалась выше, чем для чистых оксидов. Следует отметить, что эффект синергизма для системы Cu–Ce наблюдался при избытке CeO_2 , а для Fe–Ce, Co–Ce и Mn–Ce, наоборот для составом с большим содержанием оксида 3d металла и меньшим количеством CeO_2 .

При объяснении эффекта синергетизма активности было высказано предположение об образовании новых фаз в катализаторах, проявляющих сверхаддитивную активность. Данные РДА для образцов Cu–Ce, обнаруживающих синергизм, свидетельствовали о высокодисперсном состоянии обоих оксидов, но не показывали образования новых фаз. Наоборот, в соосажденных Cr–Ce системах, не проявлявших синергизма активности, по данным РДА, наблюдалось образование твердых растворов. У исследователей пока нет единого четкого объяснения проявления эффекта синергизма в церийоксидсодержащих системах.

По другим литературным данным [29,30] каталитическая активность смешанных катализаторов сильно зависит от способа приготовления. Методы приготовления, как сообщается в [29], сильно влияют на активность медно-цериевых катализаторов. Различия в методе приготовления катализатора часто ведут к изменениям в морфологии и дисперсии частиц меди. Наиболее частые методы приготовления включают в себя совместное соосаждение, отложение-осаждение, пропитывание, применение конденсации инертного газа, золь-гель метод.

Вывод.

Согласно изученным литературным данным выявлено, что окисление CO на оксиде церия происходит по механизму Марса – Ван Крвелена и структура CeO_2 не претерпевая каких либо изменений, может аккумулировать большую часть кислородных вакансий. Это соответствует

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИЦ (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 9.035
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

трансформации согласно уравнениям (3) и (4). Данной особенностью CeO_2 , определяется его так называемая кислородная емкость (oxygen storage capacity, OSC), которую связывают с наличием окислительно – восстановительной пары $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$. Применение диоксида церия в TWC катализаторах обуславливается функцией OSC и связанной с ней способностью быстрой транспортировки кислорода, а также одной из

наиболее важных особенностей церийоксидсодержащих катализаторов TWC является высокая степень синергетического взаимодействия с благородными металлами. Именно с этими обстоятельствами во многом связано рост числа публикаций посвященных исследованию свойств церийоксидсодержащих катализаторов.

References:

1. Valavanidis, A. (2018). The Shift to Diesel Fuel Engines and How the Emission Scandal of Diesel Vehicles Unfolded. *World Energy Consumption of Transportation Sector. Scientific Reviews, 1*, 1-26.
2. Dzhumalieva, G. T., Timovkina, L. Jy., Romanova, A. A., Sharova, I. S., & Bezuglova, M. S. (2018). *Zagryaznenie atmosfernogo vozduha avtomobil`nym transportom*. In *Geograficheskie nauki i obrazovanie* (pp. 144-147).
3. Pavlova, E. I. (2000). *Jekologija transporta: uchebnik dlja vuzov*. (p.248). Moscow: Transport.
4. Bahmet`eva, O. I., Putinceva, O. V., & Artuhov, V. G. (2011). Vlijanie oksida ugleroda (II) na uroven` jekspressii CD8 receptorov limfocitami krovi cheloveka. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Himija. Biologija. Farmacija*, (2), 84-87.
5. Duprez, D., & Cavani, F. (Eds.). (2014). *Handbook of advanced methods and processes in oxidation catalysis: from laboratory to industry*. World Scientific.
6. Kašpar, J., Fornasiero, P., & Hickey, N. (2003). Automotive catalytic converters: current status and some perspectives. *Catalysis today*, 77(4), 419-449.
7. Krylov, O. V. (2004). *Geterogennyj kataliz*. (p.679). Moscow: IKC «Akademkniga».
8. Young, K. (2017). *Catalytic converter thermal model for hybrid electric vehicle engine on/off control strategy development* (Doctoral dissertation, University of Alabama Libraries).
9. (n.d.). *Explain that stuff!* Retrieved 15.09.2021 from <https://www.explainthatstuff.com/catalyticconverters.html>
10. Keren, J. (2011). *Fabrication and Catalytic Property of Cerium Oxide Nanomaterials* (Doctoral dissertation, Thesis University of Nebraska–Lincoln).
11. Czerwinski, F. (2020). Critical Assessment 36: Assessing differences between the use of cerium and scandium in aluminium alloying. *Materials Science and Technology*, 36(3), 255-263.
12. Brykin, A. V., Artemov, A. V., & Kolegov, K. A. (2014). Analiz rynka redkozemel`nyh jelementov (RZJe) i RZJe-katalizatorov. *Kataliz v promyshlennosti*, (4), 7-15.
13. Malutin, A. V. (2014). *Nanostruktury vzaimodejstvija metallnositel` v nanesennyh katalizatorah Me/CeO. 72 ZrO. 18 PrO. 1 O 2 (gde Me= Pt, Pd, Ru)*: diss. kand. him. nauk. Moscow: RHTU.
14. Trovarelli, A. (2002). *Catalysis by ceria and related materials* (Vol. 2). World Scientific.
15. Serebrennikov, V. V. (1961). *Himija redkozemel`nyh jelementov (skandij, itrij, lantanidy)*: V 2 t: 4 kn. T. 2. Kn. 2, 3, 4.
16. Krylova, A. V., & Mihajlichenko, A. I. (2000). Cerijsoderzhashhie oksidnye katalizatory. Chast` 2. *Him. tehnologija*, 10, pp. 8-24.
17. (1998). *Himicheskaja jenciklopedija: v 5 t*. Moscow: Bol'shaja Rossijskaja Jenciklopedija. 1988–1998. t. 5, 783 p.
18. Ganduglia-Pirovano, M. V., Hofmann, A., & Sauer, J. (2007). Oxygen vacancies in transition metal and rare earth oxides: Current state of understanding and remaining challenges. *Surface science reports*, 62(6), 219-270.
19. Ivanova, A. S. (2008). *Fiziko-himicheskie i kataliticheskie svojstva sistem na osnove CeO2*. In VI Rossijskaja konferencija s uchastiem stran SNG" Nauchnye osnovy prigotovlenija i tehnologii katalizatorov". V Rossijskaja konferencija s uchastiem stran SNG" Problemy dezaktivacii katalizatorov" (pp. 15-16).
20. Badaev, F. Z., Arbuzova, L. A., Kotyhova, O. A., Seregina, I. E., & Hajri, A. H. (2016). *Himicheskie svojstva neorganicheskikh veshhestv*.

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
PIHII (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 9.035
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

21. Krylova, A. V., & Mihajlichenko, A. I. (2005). Cerijoksidsoderzhashhie promyshlennye i perspektivnye katalizatory. *Kataliz v promyshlennosti*, (3), 3-11.
22. Liu, Y., Wen, C., Guo, Y., Lu, G., & Wang, Y. (2010). Effects of surface area and oxygen vacancies on ceria in CO oxidation: Differences and relationships. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 316(1-2), 59-64.
23. Parinyaswan, A., Pongstabodee, S., & Luengnaruemitchai, A. (2006). Catalytic performances of Pt-Pd/CeO₂ catalysts for selective CO oxidation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(13), 1942-1949.
24. Chzhou, Ja. (1996). *Kataliticheskoe okislenie SO na binarnyh oksidah f-i d-jelementov*.
25. Stajlz, Je. B. (1991). *Nositeli i nanesennye katalizatory. Teorija i praktika*. (pp.48-50). Moscow: Himija.
26. Krylova, A. V., & Mihajlichenko, A. I. (2000). Cerijsoderzhashhie oksidnye katalizatory. Chast` I. *Himicheskaja tehnologija*, 1(9), 2-16.
27. Gazarov, G.A., & Moiseev, R.A. (1980). Itogi nauki i tehniki. *Kinetika i kataliz*, №7, p.113.
28. Tang, C. W., Kuo, M. C., Lin, C. J., Wang, C. B., & Chien, S. H. (2008). Evaluation of carbon monoxide oxidation over CeO₂/Co₃O₄ catalysts: Effect of ceria loading. *Catalysis today*, 131(1-4), 520-525.
29. Tang, X., Zhang, B., Li, Y., Xu, Y., Xin, Q., & Shen, W. (2004). Carbon monoxide oxidation over CuO/CeO₂ catalysts. *Catalysis Today*, 93, 191-198.
30. Avgouropoulos, G., & Ioannides, T. (2006). Effect of synthesis parameters on catalytic properties of CuO-CeO₂. *Applied Catalysis B: Environmental*, 67(1-2), 1-11.