УДК: 544.4+502.1

СИНТЕЗ ФЕРРИТА КОБАЛЬТА НА ОСНОВЕ ОКСИДА КОБАЛЬТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СИНТЕЗ-ГАЗА В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕРАБОТКИ БИОМАССЫ

Ю.Н. Сахарова, М.Б. Сейоум, А.В. Кунин

Кафедра технологии неорганических веществ, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000 E-mail: saharova_yun@stud.isuct.ru*, karbon37@bk.ru, kunin_av@isuct.ru

В работе проведен процесс синтеза феррита кобальта из оксида кобальта и оксалата железа. На первом этапе был синтезирован гидроксид кобальта из сульфата, нитрата и хлорида кобальта. Доказано, что Со(ОН)₂, полученный из сульфата кобальта, имеет наиболее мелкие частицы. Следующая стадия заключалась в получении оксида кобальта. Для этого прокаливали гидроксид кобальта при температурах 200 °C и 400 °C. В зависимости от исходного сырья были исследованы физико-химические свойства СозО4 методами рентгенострукторуного анализа, сканирующей электронной микроскопии и математического описания физической адсорбции. По данным рентгеноструктурного анализа образцы оксида кобальта имеют близкие параметры решетки. Удельная поверхность оксида кобальта, в зависимости от исходного сырья, составляет 70-82 м²/г. По данным ренгеноструктурного анализа установлено, что размер первичных частиц Со₃О₄, синтезированного по сульфатной или нитратной технологиям, составляет 5-25 нм. Последняя стадия синтеза заключалась в получении феррита кобальта из оксида кобальта и оксалата железа с использованием метода механохимического синтеза. Для приготовления катализатора рекомендовано использовать сульфат кобальта, а в качестве осадителя – раствор NaOH. В работе использовалась лабораторная ролико-кольцевая вибрационная мельница VM-4 (Чехия) с частотой колебаний 930 мин⁻¹. Продолжительность механохимического синтеза – 30 мин. Представлена рентгенограмма катализатора на основе оксида кобальта и оксалата железа. Было установлено, что при температуре прокаливания 350 °C формируется феррит кобальта и все пики были отнесены к структуре шпинели.

Ключевые слова: биомасса, биотопливо, возобновляемая энергетика, оксид кобальта, механохимический синтез, оксалат железа

SYNTHESIS OF COBALT FERRITE BASED ON COBALT OXIDE FOR PRODUCING SYNTHESIS GAS IN THE PROCESS OF BIOMASS PROCESSING

Yu.N. Sakharova, M.B. Seyoum, A.V. Kunin

Department of Inorganic Substances Technology, Ivanovo State University of Chemical Technology, Sheremetevsky Ave., 7, Ivanovo, Russian Federation, 153000 E-mail: saharova_yun@stud.isuct.ru*, karbon37@bk.ru, kunin_av@isuct.ru

The work presents the process of synthesizing cobalt ferrite from cobalt oxide and iron oxalate. At the first stage, cobalt hydroxide was synthesized from cobalt sulfate, nitrate and chloride. It was proven that $Co(OH)_2$ obtained from cobalt sulfate has the smallest particles. The next stage consisted of obtaining cobalt oxide. For this, cobalt hydroxide was calcined at temperatures of 200 °C and 400 °C. Depending on the initial raw material, the physicochemical properties of Co_3O_4 were studied using X-ray diffraction analysis, scanning electron microscopy and mathematical description of physical adsorption. According to X-ray diffraction analysis, the cobalt oxide samples have close lattice parameters. The specific surface area of cobalt oxide, depending on the initial raw material, is 70-82 m²/g. According to X-ray diffraction analysis, the size of the primary particles of Co_3O_4 synthesized using sulfate or nitrate technologies is 5-25 nm. The last stage of the synthesis consisted in obtaining cobalt ferrite from cobalt oxide and iron oxalate using the mechanochemical synthesis method. It is recommended to use cobalt sulfate for the catalyst preparation, and a NaOH solution as a precipitator. A laboratory roller-ring vibration mill VM-4 (Czech Republic) with an oscillation frequency of 930 min⁻¹ was used in the work. The duration of the mechanochemical synthesis was 30 min. An X-ray diffraction pattern of the catalyst based on cobalt oxide and iron oxalate is presented. It was found that at a calcination temperature of 350 °C, cobalt ferrite is formed and all peaks were attributed to the spinel structure.

Keywords: biomass, biofuel, renewable energy, cobalt oxide, mechanochemical synthesis, iron oxalate

Для цитирования:

Сахарова Ю.Н., Сейоум М.Б., Кунин А.В. Синтез феррита кобальта на основе оксида кобальта для получения синтез-газа в процессе переработки биомассы. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва).* 2024. Т. LXVIII. № 4. С. 103–109. DOI: 10.6060/rcj.2024684.13.

For citation:

Sakharova Yu.N., Seyoum M.B., Kunin A.V. Synthesis of cobalt ferrite based on cobalt oxide for producing synthesis gas in the process of biomass processing. *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N 4. P. 103–109. DOI: 10.6060/rcj.2024684.13.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие науки и технологий для замены ископаемых ресурсов возобновляемой биомассой стало приоритетным направлением в настоящее время из-за проблем с изменением климата [1]. Структурно молекулы на основе биомассы сильно отличаются от углеродных форм, содержащихся в ископаемых ресурсах, и преобразование этих структурно разнообразных систем с высоким содержанием кислорода в возобновляемые эквиваленты является сложной задачей. Растительная биомасса является уникальным сырьем в силу практически неисчерпаемых ресурсов. Ежегодно в мире образуется около 200 млрд. т древесной биомассы, что превышает суммарную мировую добычу нефти, угля и природного газа [2,3]. Энергоэффективные процессы катализа на основе переходных металлов с эффективной возможностью вторичной переработки являются наиболее востребованными методами решения этих проблем [4]. Многие химические методы катализа, разработанные в синтетической органической химии, могут быть применены для систем на биологической основе, и катализ на основе оксида кобальта и железа в последнее время привлек внимание в этой области [5].

Использование кобальта и железа в катализе имеет долгую историю, и наиболее широко используемым применением является синтез аммиака путем объединения молекулярного азота и водорода под высоким давлением более 200 атм при температурах выше 400 °C по процессу Хабера–Боша [6]. Вторым по распространенности применением является процесс Фишера-Тропша с использованием катализаторов на основе железа, который преобразует смесь монооксида углерода и водорода, известную как синтез-газ, в жидкие углеводороды [7]. Смесь монооксида углерода и водорода, используемая в качестве сырья для процесса Фишера-Тропша, традиционно поступает из ископаемых ресурсов, таких как уголь или природный газ, однако газификация биомассы также может быть использована в качестве источника синтез-газа [8].

В работах [9,10] рассмотрены применяемые на практике и разрабатываемые подходы в области подбора катализаторов глубокой переработки растительной биомассы. Авторы приводят примеры использования катализаторов в процессах получения ценных химических продуктов из растительных полимеров. Установлено, что кислотные катализаторы ускоряют преимущественно разрыв связей С–С, а гидрирующие катализаторы – разрыв связей С–О.

Вопросы каталитической конверсии биомассы изучали авторы в работах [11,12]. Например, на стадии деполимеризации биомассы использовались катализаторы на основе цеолитов. В результате применения цеолитов исходная биомасса была превращена в растворимые продукты с эффективностью 85%. На стадии же гидрогенолиза и гидрокрекинга использовались металлические катализаторы на основе никеля и рутения. Выход биотоплива (жидкие углеводороды) составил 65% от общей массы биомассы.

В качестве перспективных можно рассматривать катализаторы на основе оксидов кобальта и

железа со структурой шпинели [13]. Как правило, способ получения оксида кобальта существенно влияет на его активность. В последние годы отмечается повышенный интерес к механохимическому синтезу [14-17]. Катализаторы, которые были синтезированы с использованием механохимической активации, имеют ряд преимуществ: экологичность, повышенная каталитическая активность. Они могут использоваться в процессе получения синтез-газа при переработке биомассы. В связи с этим целью работы является исследование процесса получения катализатора на основе оксида кобальта и оксалата железа с использованием методов механохимической активации.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для получения оксида кобальта, а в последующем феррита кобальта, получали гидроксид кобальта Со(ОН)2. Для этого готовили 25%-ные растворы CoSO₄·7H₂O, CoCl₂·6H₂O, Co(NO₂)₂·6H₂O, к которым добавляли 0,1М раствор NaOH до pH=8. Затем осадок фильтровали и промывали горячей водой методом декантации. Далее полученный гидроксид кобальта прокаливали при температурах 200 и 400 °C. После выбора наилучшего сырья был получен феррит кобальта с использованием метода механохимической активации [18-20] из оксалата железа и оксида кобальта. Процесс синтеза осуществляли путем совместной механической активации исходных компонентов в лабораторной ролико-кольцевой вибрационной мельнице VM-4 (Чехия) с частотой колебаний 930 мин⁻¹. В качестве мелющих тел использовались ролик и кольцо из химически стойкой стали марки ШХ15, общая масса которых 1194 г., количество активируемого материала 100 г. Время механохимической активации составляло 30 мин. Заключительным этапом является термическая обработка полученной контактной массы при температуре 350 °С в течение 6 ч и таблетирование для формирования гранул.

Рентгенофазовый анализ исследуемых образцов был проведен на дифрактометре ДРОН-ЗМ с использованием Си_{кα}-излучения. Дифракционные спектры выводились на сопряженную с дифрактометром ЭВМ и обрабатывались с помощью специально составленных программ. Съемку профилей интерференционных линий проводили при ширине щелей 0,5х0,5 мм, шаге съемки 0,01° и скорости вращения гониометра 2°/мин по шкале.

Площадь поверхности, изотермы адсорбции-десорбции и данные по распределению пор по размерам получены на приборе Sorbi-MS. Удельную поверхность определяли методом БЭТ (соответствует международным стандартам ASTM и ISO) по низкотемпературной адсорбции – десорбции азота. Диапазон измерения площади удельной поверхности: от 0,1 м²/г до 2000 м²/г. «Sorbi®-MS» сопряжена и управляется с помощью ПК. Специализированное программное обеспечение обрабатывает полученные данные автоматически. Перед исследованием образцы были обработаны в токе азота при заданной температуре в течение 60 мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлена микрофотография гидроксида кобальта, синтезированного из сульфата кобальта. Рассчитанный размер частиц составляет от 0,3 до 15 мкм. Следует отметить, что $CoSO_4$ более перспективное сырье для синтеза катализатора, т.к. является дешевым и имеет высокую удельную поверхность (табл. 1) по сравнению с $CoCl_2$ и $Co(NO_3)_2$.



Рис. 1. Микрофотографии частиц Со(OH)₂, полученного из сульфата кобальта

Следующей стадией синтеза оксида кобальта является прокаливание полученного $Co(OH)_2$. Для исследования пористой структуры синтезируемых порошков Co_3O_4 были проведены исследования по измерению удельной поверхности и пористости методом низкотемпературной адсорбции и десорбции азота (БЭТ) на приборе Sorbi (таблица).

Анализ результатов измерения показывает, что оксид кобальта, приготовленный по сульфатной технологии, имеет высокую удельную поверхность – 81,35 м²/г, по сравнению с нитратной и хлоридной технологиями.

Площадь удельной поверхности методом БЭТ		
	Площадь удельной поверхности, м ² /г	
Образец	200 °C	400 °C
Со ₃ О ₄ из Со(NO ₃) ₂ ·6H ₂ О	72,84	60,31
Со ₃ О ₄ из СоSO ₄ ·7H ₂ O	81,35	72,77
Со ₃ О ₄ из СоСl ₂ ·6H ₂ О	52,46	40,81



Рис. 2. Рентгенограммы Со₃О₄, полученного из а – сульфата, б - хлорида, в – нитрата кобальта. Температура прокаливания 200 °С. 1 - Со₃О₄



Рис. 3. Рентгенограммы Со₃О₄, полученного из а – сульфата, б - хлорида, в – нитрата кобальта. Температура прокаливания 400 °С. 1 - Со₃О₄

Прокаливание образцов Co(OH)₂ при температуре 200 °C приводит к формированию фазы Co₃O₄ по реакции:

$$3Co(OH)_2 + 1/2O_2 \rightarrow Co_3O_4 + 3H_2O$$
 (1)

Все образцы идентифицируются как однофазный Со₃О₄ (рис. 2). Однако величина и ширина характеристических рефлексов сильно отличаются друг от друга и позволяют выявить наиболее дефектный и реакционно-способный Со₃О_{4.}

Таблица

Как видно из анализа рентгенограмм, наиболее дефектными, имеющими наименьший размер первичных частиц, являются образцы Co₃O₄, полученные по сульфатной и близкой к ней нитратной технологиям. Эксплуатация катализатора предполагается при температурах 300-400 °С, по этой причине были проведены дополнительные исследования методом рентгеноструктурного анализа для выявления характера деформационного процесса в оксидах.

Увеличение температуры прокаливания до 400 °С приводит к повышению интенсивности рентгеновских пиков Co₃O₄ и уменьшению их полуширины, что свидетельствует о протекании процессов агломерации, приводящих к росту среднего размера кристаллитов.

После изучения физико-химических свойств компонентов катализатора и выбора лучшего, был произведен синтез CoFe₂O₄, который осуществлялся с помощью метода механохимической активации из оксалата железа и оксида кобальта, полученного по сульфатной технологии. Температура прокаливания после механохимического синтеза составила 350 °C.



Рис. 4. Рентгенограмма синтезированного CoFe₂O₄. Температура прокаливания 350 °C. 1- CoFe₂O₄. Co₃O₄/FeC₂O₄ – стехиометрия

ЛИТЕРАТУРА

- Shiyun Liu, Dongjin Dai, Yunyang Lu, Ji Chen, Danhua Mei, Zhi Fang, Xin Tu. Tailoring performance for biomass tar reforming using magnetically assisted gliding arc discharges. Chemical Engineering Journal. 2024. V. 498. DOI: 10.1016 /j.cej.2024.155364.
- 2. А. Б. Берберов, Я. А. Масютин, Д. С. Афонин, Х. Х. Борзаев. Применение коллоидного катализатора на основе оксида железа (III) и полиметаллического нанокатализатора (Fe-Co-Ni) для модификации структуры лигноцеллюлозного сырья. Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2013. № 6-1(56). С. 72-78. EDN RPXLSZ.
- 3. *Андреева, Е. В.* Использование местных энергоресурсов в энергетике села [Растительные и древесные отходы, пе-

На рис. 4 представлена рентгенограмма CoFe₂O₄. Все пики были отнесены к структуре шпинели. Это указывает на то, что никаких других кристаллических фаз, кроме CoFe₂O₄ не образовывалось.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены физико-химические свойства гидроксидов и оксидов кобальта в зависимости от температуры прокаливания и исходного сырья, такие как: размер и морфология частиц, удельная поверхность. На основании результатов исследования физико-химических и структурно-механических свойств гидроксидов и оксидов кобальта, полученных из Co(NO₃)₂·6H₂O, CoC₂O₄,CoCl₂·6H₂O, CoSO₄·7H₂O, установлено, что по величине площади удельной поверхности синтезируемого оксида кобальта Со₃О₄ удовлетворяет требованиям образец, синтезированный из сульфата кобальта. По данным рентгеноструктурного анализа установлено, что увеличение температуры прокаливания до 400 °C приводит к повышению интенсивности пиков Co₃O₄. Был получен CoFe₂O₄ методом механохимической активации. Данные рентгеноструктурного анализа показали, что никаких других фаз, кроме феррита кобальта, не образовывалось.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2024-481.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, agreement No. 075-15-2024-481.

The authors declare that there is no conflict of interest that requires disclosure in this article.

$R \, E \, F \, E \, R \, E \, N \, C \, E \, S$

- Shiyun Liu, Dongjin Dai, Yunyang Lu, Ji Chen, Danhua Mei, Zhi Fang, Xin Tu. Tailoring performance for biomass tar reforming using magnetically assisted gliding arc discharges. Chemical Engineering Journal. 2024. V. 498. DOI:10.1016/ j.cej.2024.155364.
- A. B. Berberov, Ya. A. Masyutin, D. S. Afonin, H. H. Borzaev. Application of colloidal catalyst based on iron (III) oxide and polymetallic nanocatalyst (Fe-Co-Ni) for modification of lignocellulosic feedstock structure. Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2013. N 6-1 (56). P. 72-78. EDN RPXLSZ.
- 3. *Andreeva, E. V.* Use of local energy resources in rural energy sector [Plant and wood waste, processing of manure into biogas and fertilizers, renewable energy sources]. Engineering

реработка навоза в биогаз и удобрения, ВИЭ]. Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. 2010. № 4. С. 939. EDN MWIEWB.

- С. Д. Емельянова, А. А. Степачева, Ю. В. Луговой, Ю. Ю. Косивцов. Кинетика термического разложения древесных отходов. Химическая термодинамика и кинетика: Сборник научных трудов XIII Международной научной конференции, г. Великий Новгород, 15–19 мая 2023 года.
 Великий Новгород: Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, 2023. С. 110-112. EDN PTWYBE.
- Emmanuel, J.K. Combinatorial high throughput methodologies: the potentials in heterogeneous catalysts synthesis, screening and discovery—a review. Bull Natl Res Cent 48, 24 (2024). DOI:10.1186/s42269-024-01180-8.
- C. Smith, A.K. Hill, L. Torrente-Murciano. Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape Energy Environ Sci, 13 (2020), P. 331-344. DOI:10.1039/C9EE02873K.
- L. Shuai, C. Liu, G. Wang, Y. Zhang, J. Li, L. Wang. Structural evolution of carbon in an Fe@C catalyst during the Fischer-Tropsch synthesis reaction Catal. Sci. Technol., 9 (2019). P. 1013-1020. DOI: 10.1039/x0xx00000x.
- Миргаязов, И. И., А. И. Абдуллин. Современные методы получения синтез-газа и процесс Фишера-Тропша. Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 9. С. 258-261. EDN SFMLAN.
- Кузнецов, Б. Н. Научные основы подбора катализаторов для процессов глубокой переработки твердого ископаемого и возобновляемого органического сырья. Кинетика и катализ. 2009. Т. 50. № 6. С. 886-894. – EDN KYGLIZ.
- Филатова А.Е., Е. И. Шиманская, М. Г. Сульман, Д. В. Гакипова. Пути полной каталитической переработки компонентов биомассы. Бюллетень науки и практики. – 2017. № 12(25). С. 50-56. DOI 10.5281/zenodo.1101147.
- Бабич О.О., Ю. В. Куликова, С. А. Сухих. Обзор исследований в области развития технологий прямого получения жидкого топлива из биомассы. The Scientific Heritage. 2021. № 80-1(80). С. 41-47. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-80-1-41-47.
- Anna Klyushina, Kateřina Pacultová, Stanislava Krejčová, Grzegorz Słowik, Květuše Jirátová, František Kovanda, Janusz Ryczkowski, Lucie Obalová. Advantages of stainless steel sieves as support for catalytic N₂O decomposition over K-doped Co₃O₄, Catalysis Today,V. 257, Part 1. 2015. P. 2-10. DOI:10.1016/j.cattod.2015.05.015.
- Денисова К.О. А. А. Ильин, А. П. Ильин, Ю. Н. Сахарова. Влияние состава катализатора и условий процесса на эффективность феррита кобальта в разложении оксида азота (I). Журнал физической химии. 2021. Т. 95. № 10. С. 1501-1507. DOI: 10.31857/S0044453721100058.
- Птицына К.О. А. А. Ильин, Р. Н. Румянцев, Ю. Н. Сахарова. Механохимический и керамический синтез феррита кобальта. Стекло и керамика. 2022. Т. 95. № 1(1129). С. 21-30. DOI: 10.14489/glc.2022.01.pp.021-030.
- Курникова А.А., Румянцев Р.Н., Афинеевский А.В., Борисова Т.Н., Севергина Е.С., Гордина Н.Е. Мягкий механохимический синтез CuO/ZnO/Al₂O₃ катализатора для процесса получения метанола. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2024. Т. 67. Вып. 2. С. 21-29. DOI: 10.6060/ivkkt.20246702.6866.

and technical support of the agro-industrial complex. Abstract journal. 2010. N 4. P. 939. - EDN MWIEWB.

- S. D. Emelyanova, A. A. Stepacheva, Yu. V. Lugovoy, Yu. Yu. Kosivtsov. Kinetics of thermal decomposition of wood waste. Chemical thermodynamics and kinetics: Collection of scientific papers of the XIII International Scientific Conference, Veliky Novgorod, May 15-19, 2023. Veliky Novgorod: Yaroslav the Wise Novgorod State University. 2023. P. 110-112. EDN PTWYBE.
- 5. *Emmanuel, J.K.* Combinatorial high throughput methodologies: the potentials in heterogeneous catalysts synthesis, screening and discovery—a review. Bull Natl Res Cent 48, 24 (2024). DOI:10.1186/s42269-024-01180-8.
- C. Smith, A.K. Hill, L. Torrente-Murciano. Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape Energy Environ Sci, 13 (2020). P. 331-344. DOI:10.1039/C9EE02873K.
- L. Shuai, C. Liu, G. Wang, Y. Zhang, J. Li, L. Wang. Structural evolution of carbon in an Fe@C catalyst during the Fischer-Tropsch synthesis reaction Catal. Sci. Technol., 9 (2019). P. 1013-1020. DOI: 10.1039/x0xx00000x
- Mirgayazov, I. I., A. I. Abdullin. Modern methods of producing synthesis gas and the Fischer-Tropsch process. Bulletin of the Kazan Technological University. 2014. V. 17. N 9. P. 258-261. EDN SFMLAN.
- 9. *Kuznetsov, B. N.* Scientific basis for the selection of catalysts for deep processing of solid fossil and renewable organic raw materials. Kinetics and catalysis. 2009. V. 50. N 6. P. 886-894. EDN KYGLIZ.
- Filatova A.E., E. I. Shimanskaya, M. G. Sulman, D. V. Gakipova. Pathways for Complete Catalytic Processing of Biomass Components. Bulletin of Science and Practice. 2017. N 12 (25). P. 50-56. DOI 10.5281 / zenodo.1101147.
- Babich O.O., Yu. V. Kulikova, S. A. Sukhikh. Review of Research in the Field of Development of Technologies for Direct Production of Liquid Fuels from Biomass. The Scientific Heritage. 2021. N 80-1 (80). P. 41-47. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-80-1-41-47.
- Anna Klyushina, Kateřina Pacultová, Stanislava Krejčová, Grzegorz Słowik, Květuše Jirátová, František Kovanda, Janusz Ryczkowski, Lucie Obalov b. Advantages of stainless steel sieves as support for catalytic N₂O decomposition over K-doped Co₃O₄, Catalysis Today,Vio 257. Part 1. 2015. P. 2-10. DOI:10.1016/j.cattod.2015.05.015.
- Denisova K.O. A. A. Ilyin, A. P. Ilyin, Yu. N. Sakharova. Effect of catalyst composition and process conditions on the efficiency of cobalt ferrite in the decomposition of nitrogen (I) oxide. Russian Journal of Physical Chemistry. 2021. V. 95. N 10. P. 1501-1507. DOI: 10.31857/S0044453721100058.
- Ptitsyna K. O., A. A. Ilyin, R. N. Rumyantsev, Yu. N. Sakharova. Mechanochemical and ceramic synthesis of cobalt ferrite. Glass and Ceramics. 2022. V. 95. N 1(1129). P. 21-30. DOI: 10.14489/glc.2022.01.pp.021-030.
- Kurnikova A.A., Rumyantsev R.N., Afineevsky A.V., Borisova T.N., Severgina E.S., Gordina N.E. Soft mechanochemical synthesis of CuO/ZnO/Al₂O₃ catalyst for the process of methanol production. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2024. T. 67. N 2. P. 21-29. DOI: 10.6060/ivkkt.20246702.6866.
- 16. Lysenko E.N., Surzhikov A.P., Vlasov V.A., Nikolaev E.V., Minina Yu.S., Sheveleva E.A. Effect of mechanical activation

- Лысенко Е.Н., Суржиков А.П., Власов В.А., Николаев Е.В., Минина Ю.С., Шевелева Е.А. Влияние механической активации реагентов на синтез Li-Sm феррита. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2024. Т. 67. Вып. 3. С. 63-72. DOI: 10.6060/ivkkt.20246703.6931.
- Сахарова Ю.Н., А.А. Ильин, К.О. Птицына. Термопрограммированное восстановление феррита кобальта водородом. Российский химический журнал. 2023. Т. 67. № 1. С. 57-63. – DOI 10.6060/гсj.2023671.8.
- Yu.A. Ivanova, E.F. Sutormina, L.A. Isupov. Low-temperature decomposition of N₂O on oxides 1% Cs/MgxCo₃ – xO₄ (x = 0–0.9). Kinetics and catalysis. 2020. T.61. N 4. P. 577–584. DOI: 10.31857/S0453881120040103
- 19. А. Г. Першина, Л. В. Ефимова, В. И. Итин. Наноразмерный стабилизатор ферментов на основе частиц феррита кобальта. Нанотехника. 2010. № 2(22). С. 81-86. EDN MWAKSR.
- А. А. Ильин, Р. Н. Румянцев, И. А. Дубова, А. П. Ильин. Синтез и каталитические свойства феррита кобальта в реакции разложения оксида азота (I). Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2012. Т. 55. Вып. 10. С. 62-64.

of reagents on the synthesis of Li-Sm ferrite. Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2024. V. 67. N 3. P. 63-72. DOI: 10.6060/ivkkt.20246703.6931.

- Sakharova Yu.N., A.A. Ilyin, K.O. Ptitsyna. Temperature-programmed reduction of cobalt ferrite with hydrogen. Russian Chemical Journal. 2023. V. 67. N 1. P. 57-63. DOI 10.6060/rcj.2023671.8.
- Yu.A. Ivanova, E.F. Sutormina, L.A. Isupov. Low-temperature decomposition of N2O on oxides 1% Cs/MgxCo₃ xO₄ (x = 0–0.9). Kinetics and catalysis. 2020. V. 61. N 4. P. 577–584. DOI: 10.31857/S0453881120040103
- A. G. Pershina, L. V. Efimova, V. I. Itin. Nanosized enzyme stabilizer based on cobalt ferrite particles. Nanotechnics. 2010. N 2(22). P. 81-86. - EDN MWAKSR.
- A. A. Ilyin, R. N. Rumyantsev, I. A. Dubova, A. P. Ilyin. Synthesis and catalytic properties of cobalt ferrite in the decomposition reaction of nitrogen oxide (I). ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2012. V. 55. N. 10. P. 62-64.

Поступила в редакцию 16.09.2024 Принята к опубликованию 02.10.2024

Received 16.09.2024 Accepted 02.10.2024