

ХИМИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF INORGANIC MATERIALS

ISSN 2410-6593 (Print), ISSN 2686-7575 (Online)

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-6-502-511>



УДК 546.723 + 661.872.2

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Гетерофазный синтез феррита кобальта

Е.Е. Никишина

МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова), Москва, 119571 Россия

@Автор для переписки, e-mail: nikishina@mirea.ru

Аннотация

Цели. Разработка новых методов синтеза феррита кобальта (CoFe_2O_4), являющегося предшественником для синтеза функциональных материалов на его основе, а также исследование физико-химических свойств полученных фаз.

Методы. Гидратированный оксид железа и феррит кобальта получали гетерофазным методом. Синтезированные фазы и продукты их термоллиза изучали методами дифференциально-термического анализа и дифференциальной термогравиметрии (ДТА–ДТГ), рентгенофазового анализа (РФА) и гранулометрии.

Результаты. В статье изложены результаты двух методов синтеза феррита кобальта (CoFe_2O_4) и исследования полученных фаз. В обоих случаях в качестве предшественника выступал гидратированный оксид железа(III) с содержанием Fe_2O_3 – 84.4 мас. %, полученный гетерофазным взаимодействием хлорида железа(III) с концентрированным раствором аммиака (6.0–9.5 моль/л). Первый способ заключался во взаимодействии гидратированного оксида железа(III) с оксидом кобальта(II, III), второй – во взаимодействии гидратированного оксида железа(III) с водным раствором сульфата кобальта(II) с концентрацией $C_{\text{Co}} = 0.147$ моль/л (Т : Ж = 1 : 43). Получившиеся промежуточные продукты подвергали термической обработке при 750 °С (синтез **1**) и 900 °С (синтез **2**) в течение 10–30 ч с шагом 10 ч.

Выводы. Феррит кобальта (CoFe_2O_4) получен двумя способами. С использованием комплекса методов (РФА, ДТА–ДТГ, гранулометрии) исследованы физико-химические свойства синтезированных образцов. Установлено, что гидратированный оксид железа(III) вплоть до температуры кристаллизации (445 °С), соответствующей экзотермическому эффекту на кривой ДТА, остается рентгеноаморфным. Дальнейшее нагревание его приводит к образованию α -модификации оксида железа(III) гексагональной сингонии ($a = b = 5.037 \pm 0.002$ Å; $c = 13.74 \pm 0.01$ Å), средний размер частиц которой равен 1.1 мкм. Согласно данным РФА, в синтезе **1** при 750 °С и продолжительности термообработки

30 ч образуется однофазный феррит кобальта ($a = 8.388 \pm 0.002 \text{ \AA}$) со средним диаметром частиц 1.9 мкм. В интервале температур 720–810 °С в образце наблюдается убыль массы (около 12.5%), связанная с удалением SO_2 и SO_3 . Поэтому в синтезе **2** температуру нагревания увеличивали до 900 °С. Показано, что при 900 °С и продолжительности синтеза 30 ч также образуется феррит кобальта (CoFe_2O_4) ($a = 8.389 \pm 0.002 \text{ \AA}$). Результаты гранулометрического анализа указывают на зависимость диаметра образующихся частиц от способа получения феррита кобальта. Наименьший размер частиц (1.5 мкм) обнаружен у феррита кобальта, полученного гетерофазным взаимодействием гидратированного оксида железа(III) (Fe_2O_3 – 84.4 мас. %) с водным раствором сульфата кобальта с концентрацией $C(\text{Co}^{2+}) = 0.147$ моль/л.

Ключевые слова: железо, кобальт, феррит, оксиды, термический анализ, рентгенофазовый анализ, гранулометрический анализ

Для цитирования: Никишина Е.Е. Гетерофазный синтез феррита кобальта. *Тонкие химические технологии.* 2021;16(6):502–511. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-6-502-511>

RESEARCH ARTICLE

Heterophase synthesis of ferrite cobalt

Elena E. Nikishina

MIREA – Russian Technological University (M. V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, 119571 Russia

@Corresponding author, e-mail: nikishina@mirea.ru

Abstract

Objectives. The study aimed to develop new methods for the synthesis of cobalt ferrite (CoFe_2O_4), which is a precursor for the synthesis of CoFe_2O_4 -based functional materials, as well as to study the physicochemical properties of the obtained phases.

Methods. Two methods were used for the synthesis of CoFe_2O_4 : (1) heterophase interaction of hydrated iron oxide with cobalt(II, III) oxide and (2) heterophase interaction of hydrated iron oxide with an aqueous solution of cobalt(II) sulfate ($C_{\text{Co}} = 0.147 \text{ mol/L}$, solid/liquid = 1:43). In both cases, the precursor was hydrated iron oxide (Fe_2O_3 , 84.4 wt %), which was obtained by the heterophase interaction of iron(III) chloride with a concentrated ammonia solution (6.0–9.5 mol/L). The resulting intermediate products were subjected to thermal treatment at 750 °C (synthesis **1**) and at 900 °C (synthesis **2**) for 10–30 h in increments of 10 h. The synthesized phases and products of their thermolysis were studied by differential thermal analysis and differential thermogravimetry (DTA–DTG), X-ray diffraction analysis (XRDA), and granulometry.

Results. The hydrated iron oxide sample remained amorphous even up to the crystallization temperature of 445 °C, which corresponds to the exothermic effect on the DTA curve. Further heating led to the α -modification of iron(III) oxide of the hexagonal system ($a = b = 5.037 \pm 0.002 \text{ \AA}$; $c = 13.74 \pm 0.01 \text{ \AA}$), which has an average particle size of 1.1 μm . XRDA results showed that a synthesis temperature of 750 °C (synthesis **1**) and a heat treatment duration of 30 h were sufficient for the formation of a single-phase cobalt ferrite ($a = 8.388 \pm 0.002 \text{ \AA}$) with an average particle diameter of 1.9 μm . For synthesis **2**, a higher temperature of 900 °C was used because sample weight loss (about 12.5%) was observed in the temperature range of 720–810 °C based on the DTA results, which was due to the removal of SO_2 and SO_3 . Moreover, when synthesis temperature and duration were at 900 °C and 30 h, respectively, CoFe_2O_4 with $a = 8.389 \pm 0.002 \text{ \AA}$ was formed. The results of the granulometric analysis

showed that particles of different diameters were formed. The smallest particle size ($1.5 \mu\text{m}$) of cobalt ferrite was obtained by the heterophase interaction of hydrated iron(III) oxide (Fe_2O_3 , 84.4 wt %) with an aqueous solution of cobalt sulfate with $C_{\text{Co}} = 0.147 \text{ mol/L}$.

Conclusions. Depending on the method used for the synthesis of cobalt ferrite, particles of different diameters are formed. The smallest particle size of cobalt ferrite was obtained from the heterophase interaction of hydrated iron(III) oxide with an aqueous solution of cobalt(II) sulfate.

Keywords: iron, cobalt, ferrite, oxides, thermal analysis, X-ray phase analysis, particle size analysis

For citation: Nikishina E.E. Heterophase synthesis of cobalt ferrite. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2021;16(6):502–511 (Russ., Eng.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-6-502-511>

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря своим уникальным свойствам ферриты со структурой шпинели находят широкое применение в различных областях науки и техники. Данный класс магнитной керамики применяется в таких приложениях, как системы хранения информации, магнитные жидкости, датчики газа, катализаторы, аккумуляторные литиевые батареи, магнитопроводы, поглотители микроволн, медицинская диагностика и терапия, очистка сточных вод, биосенсоры и так далее [1–7].

Формулу феррита можно представить как AB_2O_4 . Он имеет структуру шпинели (рис. 1), в которой тетраэдрическое А-положение занимают ионы в степени окисления +2 (Mg^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Mn^{2+}). Октаэдрическое В-положение занимают в основном ионы Fe^{3+} , однако они могут быть замещены другими ионами в степени окисления +3 (Al^{3+} , Cr^{3+}). В том случае, если А-положение будут занимать ионы в степени окисления +3, а В-положение будет в равной мере заселено ионами в степенях окисления +2 и +3, структуру шпинели называют обращенной [8, 9].

Одним из представителей данного класса материалов является феррит кобальта (CoFe_2O_4) – хорошо известный магнитотвердый материал с высокой коэрцитивной силой, связанной с малым размером кристаллических зерен и сильной магнитокристаллической анизотропией, и умеренной намагниченностью. Он имеет обращенную структуру шпинели, в которой вся или большая часть ионов Co^{2+} занимает октаэдрическое В-положение, а ионы Fe^{3+} – и тетраэдрическое (А), и октаэдрическое (В) положения. Указанные свойства, наряду с высокой химической стабильностью, позволяют использовать феррит кобальта в медицине, катализе, в качестве магнит-

ного носителя информации в аудио и видеокассетах, дисках с цифровой записью высокой плотности, различных датчиках, регистрирующих устройствах, солнечных элементах и так далее [10–13].

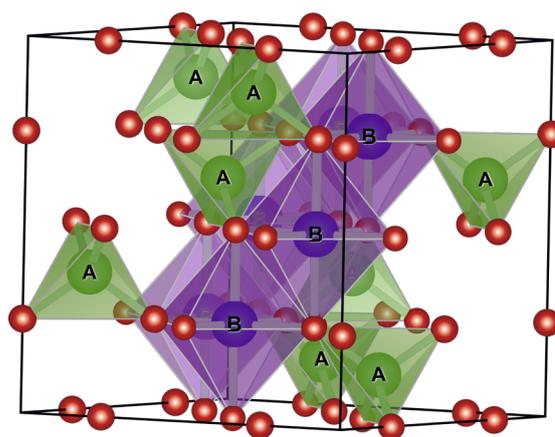


Рис. 1. Структура шпинели [9].

Fig. 1. Ferrite spinel structure [9].

Целью данной работы является разработка методов синтеза феррита кобальта, являющегося предшественником для синтеза функциональных материалов на его основе, а также исследование физико-химических свойств полученных фаз.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных веществ в работе использовали хлорид железа(III) 6-водный (*Merck*, Германия), оксид кобальта(II, III) (*Merck*, Германия), сульфат кобальта (*Merck*, Германия) и аммиак водный (*Химмед*, Россия).

Гидратированный оксид железа(III) получали гетерофазным взаимодействием хлорида железа(III) с концентрированным (6.0–9.5 моль/л) раствором гидрата аммиака.

Феррит кобальта синтезировали гетерофазным методом по двум методикам.

Синтез 1. В стеклянную колбу с притертой пробкой помещали навески гидратированного оксида железа и оксида кобальта, взятые в отношении гидратированный оксид железа/оксид кобальта = 1.5:1.0 (исходя из содержания оксида в гидроксиде и в соответствии с формулой феррита – CoFe_2O_4). В колбу к навескам приливали дистиллированную воду, после чего колбу с реакционной смесью встряхивали на вибрационном аппарате при комнатной температуре в течение 10 ч. Образовавшуюся в результате суспензию переносили в тигель и подвергали медленному упариванию, после чего получившийся промежуточный продукт подвергали термообработке при 750 °С в течение 10–30 ч с шагом 10 ч.

Синтез 2. В стеклянную колбу с притертой пробкой помещали навеску гидратированного оксида железа(III), к которой приливали раствор сульфата кобальта(II) с концентрацией $C_{\text{Co}} = 0.147$ моль/л ($T/J = 1:43$). Затем колбу встряхивали на вибрационном аппарате при комнатной температуре в течение 10 ч. Образовавшуюся в результате суспензию переносили в тигель и подвергали медленному упариванию, а получившийся в результате промежуточный продукт подвергали термообработке при 900 °С в течение 30 ч с шагом 10 ч.

Содержание оксида в гидратированном оксиде определяли гравиметрическим анализом.

Дифференциально-термический анализ (ДТА–ДТТ) образцов проводили на воздухе на дериватографе Q-1500 D (MOM, Венгрия) с одновременной записью четырех кривых: дифференциальной (ДТА), температурной (Т), дифференциально-термогравиметрической (ДТГ) и интегральной кривой изменения массы (ТГ) с использованием программно-аппаратного комплекса в среде LabVIEW 8.21 (National Instruments, США). Температуру измеряли термопарой платина–платинородий (ПП-1) с погрешностью ± 5 °С в интервале температур 20–1000 °С при скорости нагрева 10 °С/мин, используя в качестве стандарта $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Рентгенофазовый анализ (РФА) осуществляли на дифрактометре D8 Advance (Bruker, Германия) при излучении CuK_α , с непрерывным вращением образца, (1 град/мин, пошаговый шаг $2\theta = 0.02^\circ$, экспозиция 0.5 с/шаг) и режимами в интервале углов $2\theta = 5^\circ\text{--}80^\circ$. При идентификации фаз использовали картотеку ICDD – JCPDS.

Гранулометрический анализ (определение функции распределения частиц по размерам) проводили

с помощью лазерного анализатора частиц DelsaNano (Beckman Coulter, США). Удельную поверхность и размер пор измеряли на анализаторе SA 3100 (Beckman Coulter, США). Площадь поверхности вычисляли из изотерм адсорбции по методу Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ). В качестве стандарта использовали непористый образец ACX_1_4 (удельная поверхность по БЭТ 4.18 м²/г) ГСО 9735_2010¹ (комплект стандартных образцов наноструктурированного оксида алюминия ACX_1). Диапазон измерений удельной поверхности 0.1–2000 м²/г. Разрешение датчика давления 0.0062 кПа. Пределы допускаемой относительной погрешности анализатора при измерении удельной поверхности $\pm 5\%$. Предварительную дегазацию образцов осуществляли в течение 1 ч при $t = 70$ °С и давлении 0.1 Па.

Термическую обработку образцов вели в лабораторной печи ТК-12.1250.Н.1Ф с автоматическим регулятором температуры «Термоматик-Н». Погрешность автоматического регулирования при номинальной температуре составляла ± 1 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гетерофазный синтез гидратированного оксида железа(III) заключался во взаимодействии твердого хлорида железа FeCl_3 с концентрированным раствором аммиака (6.0–9.5 моль/л). Синтез протекал с высокой скоростью при комнатной температуре. При этом получили хорошо фильтрующийся порошок гидратированного оксида с высоким содержанием оксида Fe_2O_3 (84.4 мас. %), который легко отмывается от примесей и сохраняет высокую реакционную способность. При получении гидратированного оксида железа(III) важной является именно операция предварительной промывки, осуществляющаяся многократной обработкой осадка дистиллированной водой. Промывка обеспечивает получение осадка гидратированного оксида с содержанием хлорид-иона менее 0.05 мас. %. На рис. 2 представлено распределение частиц по размеру для гидратированного оксида железа(III). На гистограмме, как видно из рис. 2, присутствует ярко выраженный максимум, отвечающий максимальному присутствию частиц порошка размером 0.8–1.2 мкм. Отсюда можно считать, что гидратированный оксид является относительно монодисперсным порошком: порядка 95% приходится на частицы размером 0.7–2.0 мкм. Исследования показали, что средний размер частиц равен 1.1 мкм. Удельная поверхность гидратированного оксида железа(III), измеренная по методу БЭТ, составила 76.72 м²/г.

¹ https://gso.ru/wp-content/uploads/2016/08/catalog_gso_2020_3.pdf

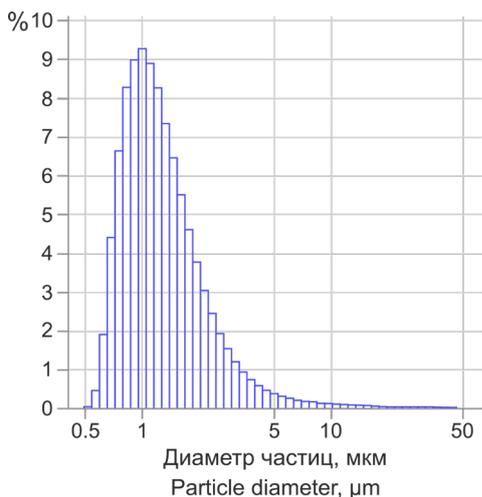


Рис. 2. Распределение частиц гидратированного оксида железа(III) по размеру.
Fig. 2. Particle size distribution of hydrated iron(III) oxide.

Термолиз гидратированного оксида железа(III) изучали в интервале температур 20–1000 °С. На рис. 3 представлены результаты ДТА. Найдено, что потере основной массы воды у гидратированного оксида железа(III), которая завершается к 200 °С, соответствует эндотермический эффект на кривой ДТА (рис. 3). Образующаяся фаза остается аморфной (что подтвердили результаты РФА). При дальнейшем повышении температуры других эндозффектов, которые могли бы свидетельствовать о ступенчатом характере дегидратации, не наблюдается. Экзоэффект при 445 °С отвечает переходу из аморфного состояния в кристаллическое. Дальнейшее нагревание выше указанной температуры сопровождается образованием кристаллического оксида Fe₂O₃. На рис. 4 представлена дифрактограмма продуктов термолиза гидратированного оксида железа(III) при 500 °С. Очевидно, при 500 °С образуется гексагональная α-модификация оксида

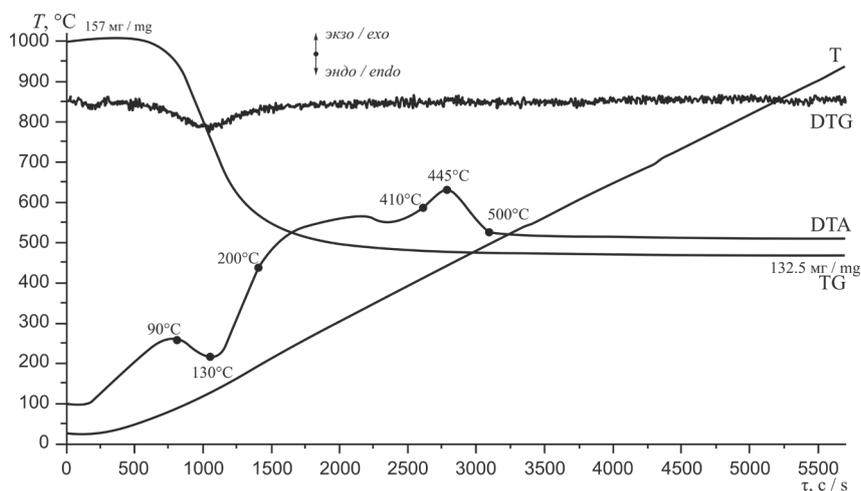


Рис. 3. Термогравитогамма гидратированного оксида железа(III) (Fe₂O₃ – 84.4 мас. %).
Fig. 3. Thermogravitogram of hydrated iron(III) oxide (Fe₂O₃, 84.4 wt %).

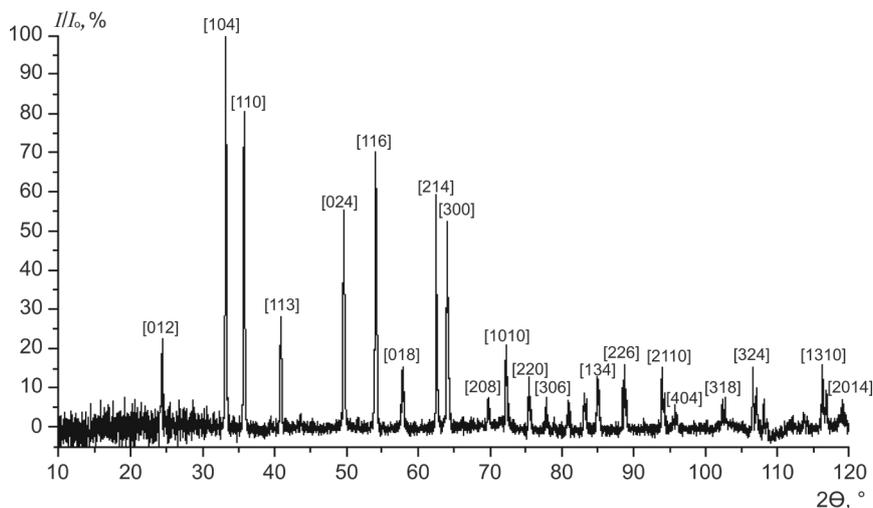


Рис. 4. Дифрактограмма продукта термолиза гидратированного оксида железа(III), T = 500 °С.
Fig. 4. X-ray diffraction pattern of the thermal decomposition product of hydrated iron(III) oxide, T = 500 °С.

железа(III). Параметры решетки $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ составляют: $a = b = 5.037 \pm 0.002 \text{ \AA}$; $c = 13.74 \pm 0.01 \text{ \AA}$.

С целью установления влияния предшественника на фазовый состав феррита кобальта проводили два синтеза, причем в обоих в качестве предшественника выступал гидратированный оксид железа(III). К нему добавляли либо оксид кобальта Co_3O_4 (синтез 1), либо приливали водный раствор сульфата кобальта(II) ($C_{\text{Co}} = 0.147$ моль/л) (синтез 2).

На рис. 5 и 6 приведены результаты термического анализа промежуточных продуктов, полученных в ходе двух синтезов после упаривания суспензий. На термогравитограммах наблюдается эндотермический эффект, связанный с процессами дегидратации (50–135 °С, рис. 5; 75–160 °С и 275–330 °С, рис. 6), а также удалением SO_2 и

SO_3 (725–805 °С и 805–870 °С [15], рис. 6). В обоих случаях не наблюдается экзотермический эффект при 445 °С, отвечающий кристаллизации индивидуального гидратированного оксида железа(III). На термогравитограмме промежуточного продукта, полученного при взаимодействии гидратированного оксида железа(III) и оксида кобальта(II, III) (рис. 5), наблюдается экзоэффект при 710–770 °С, который можно связать с образованием соединения заданного состава, но образец, отожженный при температуре 710 °С, является рентгеноаморфным.

Получившиеся промежуточные продукты подвергали термообработке. В случае синтеза 1 была выбрана температура 750 °С, отвечающая экзотермическому эффекту на кривой ДТА (рис. 5), продолжительность составляла 10–30 ч с шагом 10 ч.

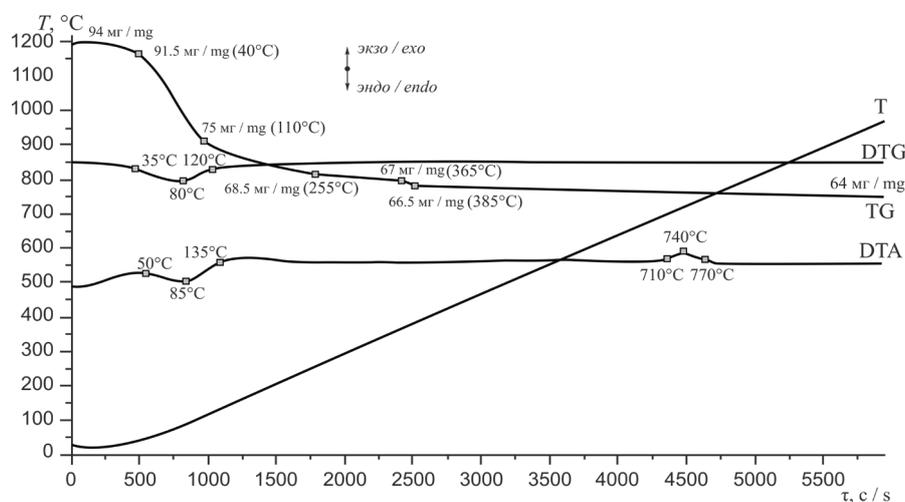


Рис. 5. Термогравитограмма промежуточного продукта, полученного при взаимодействии гидратированного оксида железа(III) и оксида кобальта(II, III) (синтез 1).

Fig. 5. Thermogravimetric analysis of the intermediate product obtained by the interaction of hydrated iron(III) oxide with cobalt(II, III) oxide (synthesis 1).

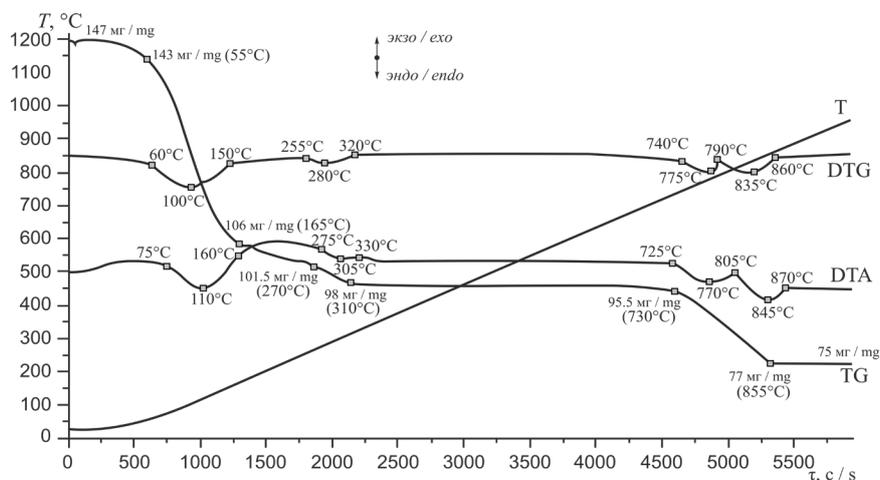


Рис. 6. Термогравитограмма промежуточного продукта, полученного при взаимодействии гидратированного оксида железа(III) с раствором сульфата кобальта(II) (синтез 2).

Fig. 6. Thermogravimetric analysis of the intermediate product obtained by the interaction of hydrated iron(III) oxide with a solution of cobalt(II) sulfate (synthesis 2).

Во всех случаях были получены мелкокристаллические порошки феррита кобальта (CoFe_2O_4), кубической сингонии, что подтверждается результатами рентгенофазового анализа (ICDD 79-1744: $a = 8.390 \text{ \AA}$). Однако в случае десятичасового отжига на дифрактограмме наблюдалось присутствие дифракционных пиков непрореагировавших оксидов железа и кобальта (рис. 7). Наиболее оптимальным оказался отжиг в течение 30 ч – на дифрактограмме присутствуют ярко выраженные пики только одной фазы – кубического (CoFe_2O_4) (рис. 8). Рассчитанные для него параметры решетки: $a = 8.388 \pm 0.002 \text{ \AA}$.

В синтезе 2 была выбрана температура отжига $900 \text{ }^\circ\text{C}$. Это связано с тем, что вплоть до температуры $870 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается убыль массы (около 12.5%, рис. 6). Продолжительность отжига

составляла 30 ч. На рис. 9 приведена дифрактограмма полученного продукта. Параметры решетки синтезированного феррита кобальта составили $a = 8.389 \pm 0.002 \text{ \AA}$.

Выполнено исследование влияния выбора предшественников на размер частиц феррита кобальта. На рис. 10а представлено распределение частиц феррита кобальта (синтез 1, $750 \text{ }^\circ\text{C}$, 30 ч) по размеру. На гистограмме, как видно из рис. 10а, присутствует ярко выраженный максимум, отвечающий максимальному присутствию частиц порошка размером 1.5–3.0 мкм. Основной фракцией являются частицы размером 1.0–5.0 мкм (~85%). Оказалось, что средний диаметр частиц равен 1.9 мкм (у исходного гидратированного оксида железа(III) он составлял 1.1 мкм).

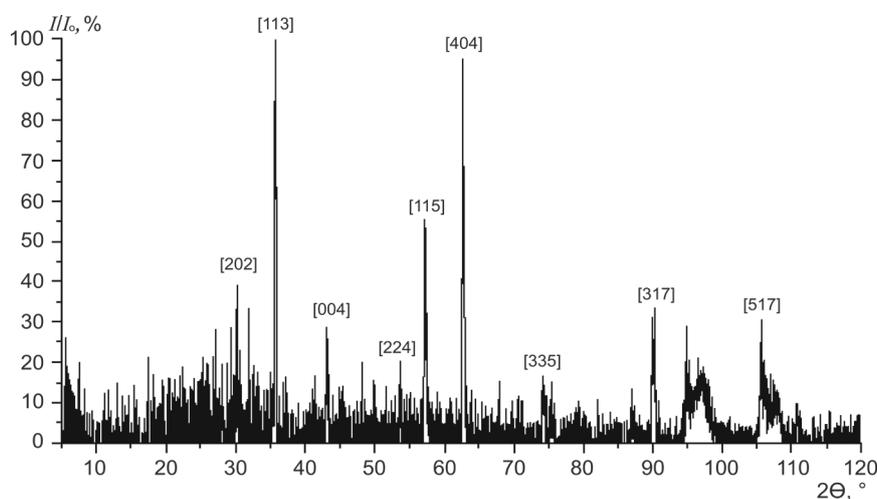


Рис. 7. Дифрактограмма феррита кобальта, синтезированного при $750 \text{ }^\circ\text{C}$ и продолжительности отжига 10 ч (синтез 1).

Fig. 7. X-ray diffraction pattern of cobalt ferrite synthesized at $750 \text{ }^\circ\text{C}$ and annealed for 10 h (synthesis 1).

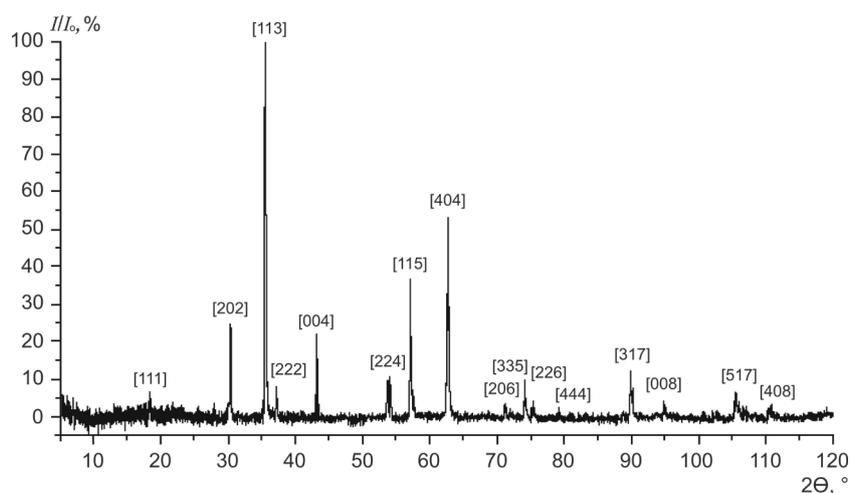


Рис. 8. Дифрактограмма феррита кобальта, синтезированного при $750 \text{ }^\circ\text{C}$ и продолжительности отжига 30 ч (синтез 1).

Fig. 8. X-ray diffraction pattern of cobalt ferrite synthesized at $750 \text{ }^\circ\text{C}$ and annealed for 30 h (synthesis 1).

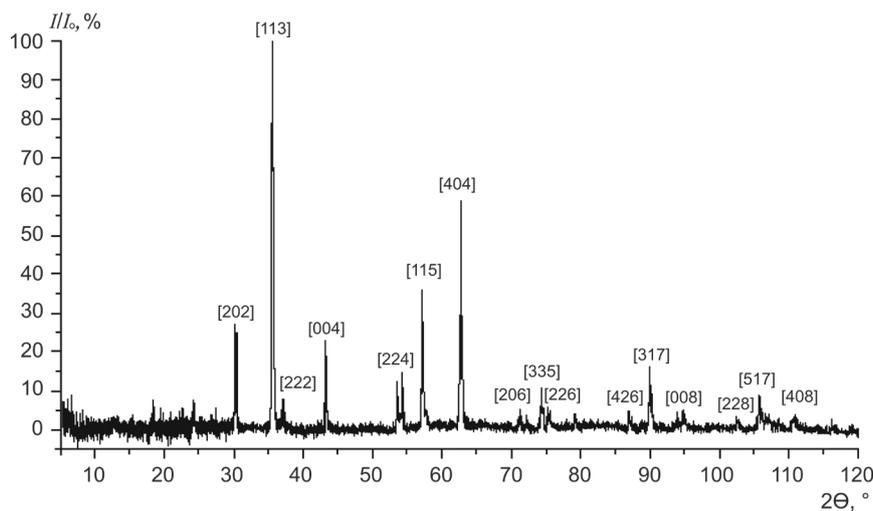


Рис. 9. Диффрактограмма феррита кобальта, синтезированного при 900 °С и продолжительности отжига 30 ч (синтез 2).

Fig. 9. X-ray diffraction pattern of cobalt ferrite synthesized at 900 °С and annealed for 30 h (synthesis 2).

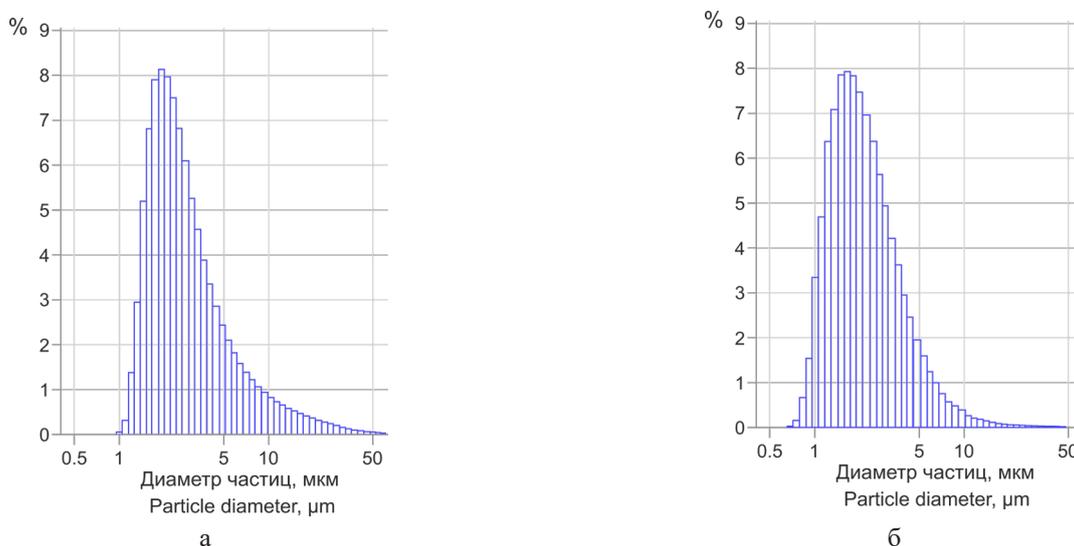


Рис. 10. Распределение частиц феррита кобальта по размеру: а – синтез 1, 750 °С, 30 ч; б – синтез 2, 900 °С, 30 ч.
Fig. 10. Particle size distribution of cobalt ferrite: (a) synthesis 1, 750 °С, 30 h; (b) synthesis 2, 900 °С, 30 h.

На рис. 10б изображено распределение частиц феррита кобальта (синтез 2, 900 °С, 30 ч) по размеру. В этом случае из гистограммы очевидно, что максимальное количество частиц порошка феррита кобальта имеет размер 1.2–3.0 мкм, а средний диаметр частиц 1.5 мкм.

Как видно из распределений, частицы наименьшего размера образовались у феррита кобальта, полученного гетерофазным взаимодействием гидратированного оксида железа(III) (Fe_2O_3 – 84.4 мас. %) с водным раствором сульфата кобальта(II) с концентрацией $C_{\text{Co}} = 0.147$ моль/л.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Феррит кобальта (CoFe_2O_4) был синтезирован двумя способами. Первый способ заключается во

взаимодействии гидратированного оксида железа(III) и оксида кобальта(II, III) с последующей термической обработкой при 750 °С в течение 30 ч (синтез 1), второй – в гетерофазном взаимодействии оксида железа(III) (Fe_2O_3 – 84.4 мас. %) с водным раствором сульфата кобальта(II) с концентрацией $C_{\text{Co}} = 0.147$ моль/л с последующей термической обработкой при 900 °С в течение 30 ч (синтез 2).

С использованием комплекса методов (РФА, ДТА–ДТГ, гранулометрии) исследованы физико-химические свойства синтезированных образцов.

Результаты исследований гидратированного оксида железа(III) показали, что вплоть до температуры кристаллизации (445 °С), соответствующей экзотермическому эффекту на кривой ДТА, образец остается рентгеноаморфным. Дальнейшее нагревание приводит

к образованию α -модификации оксида железа(III) гексагональной сингонии ($a = b = 5.037 \pm 0.002 \text{ \AA}$; $c = 13.74 \pm 0.01 \text{ \AA}$), средний размер частиц которой равен 1.1 мкм.

Методом РФА установлено, что в случае синтеза **1** достаточно температуры 750 °С и продолжительности термообработки 30 ч для образования однофазного феррита кобальта ($a = 8.388 \pm 0.002 \text{ \AA}$) со средним диаметром частиц 1.9 мкм. Увеличение температуры в случае синтеза **2** до 900 °С обусловлено тем, что, в соответствии с результатами дифференциально-термического анализа, в интервале температур 720–810 °С в образце наблюдается убыль массы (около 12.5%), связанная с удалением SO_2 и SO_3 . При 900 °С и продолжительности синтеза 30 ч образовался феррит кобальта (CoFe_2O_4) ($a = 8.389 \pm 0.002 \text{ \AA}$).

Показано, что в зависимости от способа получения феррита кобальта, образуются частицы разного диаметра. Наименьший размер частиц (1.5 мкм) обнаружен у феррита кобальта, синтезированного гетерофазным взаимодействием гидратированного

оксида железа(III) (Fe_2O_3 – 84.4 мас. %) с водным раствором сульфата кобальта(II) с концентрацией $C_{\text{Co}} = 0.147$ моль/л.

Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП РГУ МИРЭА при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Acknowledgments

This work was performed using the equipment of the Joint Science and Training Center for Collective Use and supported by The Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

Вклад автора

Е.Е. Никушина – проведение исследований, подготовка рукописи.

Author's contribution

Elena E. Nikishina – conducting research, preparing a manuscript.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Yan Z., Gao J., Li Y., Zhang M., Guo M. Hydrothermal synthesis and structure evolution of metal-doped magnesium ferrite from saprolite laterite. *RSC Advances*. 2015;5:92778–92787. <https://doi.org/10.1039/C5RA17145H>
2. Kefeni K.K., Mamba B.B., Msagati T.A.M. Application of spinel ferrite nanoparticles in water and wastewater treatment: A review. *Sep. Purif. Technol.* 2017 Nov;188:399–422. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.07.015>
3. Rashdan S.A., Hazeem L.J. Synthesis of spinel ferrites nanoparticles and investigating their effect on the growth of microalgae *Picochlorum* sp. *Arab J. Basic Appl. Sci.* 2020 Feb;27(1):134–141. <https://doi.org/10.1080/25765299.2020.1733174>
4. Amiri M., Salavati-Niasari M., Akbari A. Magnetic nanocarriers: Evolution of spinel ferrites for medical applications. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2019 Mar;265:29–44. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.01.003>
5. Vedrtnam A., Kalauni K., Dubey S., Kumar A. A comprehensive study on structure, properties, synthesis and characterization of ferrites. *AIMS Materials Science*. 2020;7(6):800–835. <https://doi.org/10.3934/mat.2020.6.800>
6. Zhou J., Shu X., Wang Y., Ma J. *et al.* Enhanced Microwave Absorption Properties of (1-x)CoFe₂O₄/xCoFe Composites at Multiple Frequency Bands. *J. Magn. Mater.* 2020 Jun;493:165699–165708. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165699>
7. Bartunek V., Sedmidubsky D., Hube, S., Svecov, M., Ulbrich P., Jankovsky O. Synthesis and properties of nanosized stoichiometric cobalt ferrite spinel. *Materials*. 2018 Jul;11(7):1241–1251. <https://doi.org/10.3390/ma11071241>
8. Zhou Z., Zhang Y., Wang Z., Wei W., *et al.* Electronic structure studies of the spinel CoFe₂O₄ by X-ray photoelectron spectroscopy. *Appl. Surf. Sci.* 2008 Aug;254(21):6972–6975. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.05.067>
9. Das D., Biswas R., Ghosh S. Systematic analysis of structural and magnetic properties of spinel CoB₂O₄ (B=Cr, Mn and Fe) compounds from their electronic structures. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2016 Nov;28(44):446001–446010. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/28/44/446001>
10. Swatsitang E., Phokha S., Hunpratub S., Usher B., Bootchanont A., Maensiri S., *et al.* Characterization and magnetic properties of cobalt ferrite nanoparticles. *J. Alloys Compd.* 2016 Apr;664:792–797. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.12.230>

11. Kazemi M., Ghobadi M., Mirzaie A. Based on: Cobalt ferrite nanoparticles (CoFe₂O₄ MNPs) as catalyst and support: Magnetically recoverable nano-catalysts in organic synthesis. *Nanotechnol. Rev.* 2017 Jan;7(1):1–50. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2017-0138>
12. Srinivasan S.Y., Paknikar K.M., Bodas D., Gajbhiye V. Applications of cobalt ferrite nanoparticles in biomedical nanotechnology. *Nanomedicin.* 2018 Jun;13(10):1221–1238. <https://doi.org/10.2217/nnm-2017-0379>
13. Chagas C.A., de Souza E.F., de Carvalho M.C.N.A., Martins R.L., Schmal M. Cobalt ferrite nanoparticles for the preferential oxidation of CO. *Appl. Catal. A-Gen.* 2016;519C:139–145. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2016.03.024>
14. Tatarchuk T., Bououdina M., Vijaya J.J., Kennedy L.J. Spinel Ferrite Nanoparticles: Synthesis, Crystal Structure, Properties, and Perspective Applications. In: *International Conference on Nanotechnology and Nanomaterials. NANO 2016: Nanophysics, Nanomaterials, Interface Studies, and Applications.* 2016 Aug:305–325. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56422-7_22
15. Mu J., Perimutte D.D. Thermal Decomposition of Inorganic Sulfates and Their Hydrates. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 1981 Oct;20(4):640–646. <https://doi.org/10.1021/i200015a010>

Об авторе:

Никишина Елена Евгеньевна, доцент кафедры химии и технологии редких элементов Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: nikishina@mirea.ru. Scopus Author ID 6602839662, ResearcherID O-7115-2014, <http://orcid.org/0000-0003-3579-2194>

About the author:

Elena E. Nikishina, Assistant Professor, Department of Chemistry and Technology Rare Elements, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia). E-mail: nikishina@mirea.ru. Scopus Author ID 6602839662, ResearcherID O-7115-2014, <http://orcid.org/0000-0003-3579-2194>

*Поступила: 05.10.2021; получена после доработки: 26.10.2021; принята к опубликованию: 26.11.2021.
The article was submitted: October 05, 2021; approved after reviewing: October 26, 2021; accepted for publication: November 26, 2021.*