

EDN: RUEBEC

УДК 546.05

## Effect of Alkaline Precipitation Parameters on the Properties of Magnetic NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles for Therapeutic Applications

Diana I. Nemkova<sup>\*a</sup>, Svetlana V. Saikova<sup>a, b</sup>,  
Anton E. Krolikov<sup>a</sup> and Anastasiya A. Marchenko<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS  
Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the SB RAS”  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 17.12.2024, received in revised form 21.02.2025, accepted 27.02.2025

**Abstract.** In this paper, alkaline precipitation of iron and nickel ions has been used to obtain ferrimagnetic NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles of homogeneous size and morphology, with low values of coercivity and remanent magnetization. Using the fractional factorial design (FFD 2<sup>7-4</sup>) the optimal synthesis parameters were determined: C(Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) = 0,4 M, C(Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>) = 0,8 M, C(NaOH) = 1 M, n(CTAB)/n(Ni<sup>2+</sup>+ Fe<sup>3+</sup>) = 1/60, pH = 10, temperature 25 °C, duration 5 min, volume of 0.1 M tartaric acid – 1 ml. The obtained samples were characterized by X-ray phase analysis, transmission electron microscopy, photon correlation spectroscopy. Optical and magnetic properties of the synthesized nickel ferrite have been studied. It is shown that the magnetic properties of nickel ferrite particles can be tuned by controlling their size through the selection of the reaction parameters. Under optimal conditions, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles with an average size of 18,0 ± 0,8 nm and saturation magnetization 35 emu/g, residual magnetization 6,3 emu/g, coercivity 167 Oe were obtained. The particles are suitable for therapeutic applications.

**Keywords:** nanoparticles, synthesis, nickel ferrite, alkaline deposition, ferrimagnetism.

**Acknowledgements.** The equipment of the FITC KSC SB RAS and the Center for Collective Use of the Siberian Federal University was used in the work. The work was carried out with partial financial support within the framework of the implementation of the draft state assignment FWES-2021–0014. The authors would like to thank Dmitry Anatolyevich Velikanov (L. V. Kirensky Institute of Physics SB RAS) for studying the magnetic properties of the samples.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: diana.nemkova@bk.ru



## Влияние реакционных параметров щелочного осаждения на свойства магнитных терапевтических наночастиц NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

Д. И. Немкова<sup>а</sup>, С. В. Сайкова<sup>а, б</sup>,  
А. Е. Кроликов<sup>а</sup>, А. А. Марченко<sup>а</sup>

*<sup>а</sup>Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

*<sup>б</sup>Институт химии и химической технологии СО РАН  
ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** В данной работе для получения однородных по размеру и морфологии ферромагнитных наночастиц NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> с низкими значениями коэрцитивной силы и остаточной намагниченности использовался метод щелочного соосаждения ионов железа и никеля. Методом дробного факторного эксперимента (ДФЭ 2<sup>7-4</sup>) – 1/16 реплики полного факторного эксперимента – определены оптимальные параметры синтеза, обеспечивающие получение монофазного продукта с узким распределением частиц по размерам: C(Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) = 0,4 М, C(Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>) = 0,8 М, C(NaOH) = 1 М, n(ЦТАБ)/n(Ni<sup>2+</sup>+Fe<sup>3+</sup>) = 1/60, pH = 10, температура 25 °С, продолжительность синтеза 5 мин, объём 0,1 М винной кислоты – 1 мл. Полученные в работе образцы были охарактеризованы методами рентгенофазового анализа, просвечивающей электронной микроскопии, фотонной корреляционной спектроскопии. Изучены оптические и магнитные свойства синтезированного феррита никеля. Показано, что магнитные свойства частиц феррита никеля можно настраивать, контролируя их размер подбором реакционных параметров синтеза. В оптимальных условиях получены нанокристаллиты NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, имеющие средний размер 18,0 ± 0,8 нм и обладающие характеристиками, позволяющими использовать их как магнитные терапевтические частицы: намагниченность насыщения 35 эму/г, остаточная намагниченность 6,3 эму/г, коэрцитивная сила 167 Э.

**Ключевые слова:** наночастицы, синтез, феррит никеля, щелочное осаждение, ферромагнетизм.

**Благодарности.** В работе использовано оборудование ФИЦ КНЦ СО РАН и Центра коллективного пользования СФУ. Работа проводилась при частичной финансовой поддержке в рамках реализации проекта гос. задания FWES-2021–0014.

Авторы благодарят Дмитрия Анатольевича Великанова (Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН) за исследование магнитных свойств образцов.

Цитирование: Немкова Д. И., Сайкова С. В., Кроликов А. Е., Марченко А. А. Влияние реакционных параметров щелочного осаждения на свойства магнитных терапевтических наночастиц NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия, 2025, 18(1). С. 147–157. EDN: RUEBEC

## Введение

Развитие нанотехнологий привело к прогрессу в лечении различных заболеваний. В частности, использование ферро-, ферримагнитных или суперпарамагнитных наночастиц на основе оксидов железа позволяет контролировать транспорт лекарственных препаратов в теле человека, а также точно воздействовать на определенные участки в организме [1]. К основным преимуществам метода «адресной доставки» относят значительное уменьшение токсического действия препаратов на другие органы и системы организма, возможность направлять и удерживать в определенном месте наночастицы с лекарством при помощи магнитного поля, визуализировать органы и ткани тела методами магнитно-резонансной томографии [2]. Важным свойством магнитных наночастиц является возможность осуществлять их локальный нагрев высокочастотным магнитным полем для инициации механизма десорбции/декапсулирования лекарственных агентов или для проведения магнитной гипертермии [3].

Магнитные наночастицы, используемые в терапевтических целях, для прохождения клеточных мембран должны иметь средний размер (не более 50–70 нм) и низкую токсичность. С целью снижения возможного токсичного воздействия магнитной фазы, повышения ее физико-химической устойчивости и биосовместимости их инкапсулируют или помещают в биоинертные матрицы (различные органические соединения или полимеры, в том числе природного происхождения) [4].

Преимущество использования суперпарамагнитных частиц в системах адресной доставки заключается в уменьшении их агрегирования в отсутствие магнитного поля за счёт нулевого значения остаточной намагниченности, однако для них характерна невысокая мощность магнитного воздействия, что усложняет перенос и удерживание частиц в непосредственной близости от целевого объекта, особенно при воздействии кровотока [5]. С этой точки зрения удобнее использовать в терапевтических целях наночастицы магнитомягких ферримагнетиков с низкими, но не нулевыми значениями коэрцитивной силы и остаточной намагниченности, которые обеспечивают легкость магнитного управления при незначительной агломерации частиц в отсутствие магнитного поля [6]. К таким материалам относят, в частности, феррит никеля, наночастицы которого обладают различными магнитными свойствами в зависимости от их размера, структуры и морфологии.

Эти свойства зависят от способа получения частиц, поэтому важно выбрать наиболее подходящий метод синтеза. Существуют различные подходы к получению NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, среди которых самыми распространёнными являются: твердофазный [7], золь-гель [8], сольвоотермальный [9], анионообменный [10], борогидного осаждения [11], а также метод щелочного осаждения [12–15].

Несмотря на трудоёмкую стадию промывки осадка с целью удаления избытка осадителя, многие авторы отдают предпочтение методу щелочного осаждения вследствие его лёгкой реализуемости и хорошего смешения компонентов в продукте, что позволяет снизить температуру прокаливания. Варьируя условия осаждения и температурной обработки, можно получить частицы с различными размерами, однако зачастую возникает проблема синтеза монофазного материала, содержащего однородные частицы.

Целью данной работы являлось определение оптимальных реакционных параметров щелочного соосаждения для получения однородных ферритмагнитных наночастиц феррита никеля, имеющих низкие значения остаточной намагниченности и коэрцитивной силы, подходящие для терапевтического применения, а также изучение физических свойств полученного материала.

### Материалы и методы

В работе были использованы следующие реактивы: бромид цетилтриметиламмония (ЦТАБ, PanReac AppliChem, 99 %), винная кислота,  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{NaOH}$  (все хч, “Химреактивснаб”).

Для получения наноразмерных частиц  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  в смеси растворов нитрата никеля (II) ( $V = 10$  мл,  $C = 0,2 \div 0,4$  М) и железа (III) ( $V = 10$  мл,  $C = 0,4 \div 0,8$  М) растворяли навеску бромида цетилтриметиламмония ( $n(\text{CTAB})/n(\text{Ni}^{2+} + \text{Fe}^{3+}) = 1/20 \div 1/60$ ), затем по каплям добавляли раствор  $\text{NaOH}$  ( $C = 1 \div 4$  М), осаждение вели  $5 \div 30$  мин при температуре  $25 \div 60$  °С. Образовавшийся осадок промывали водой, высушивали в течение 2 ч при температуре 110 °С и прокачивали в течение 3 ч при температуре 650 °С. В некоторых опытах к исходному раствору железа (III) (10 мл) добавляли 1 мл 0,1 М винной кислоты. Методы исследования физико-химических характеристик и свойств наночастиц подробно описаны в Дополнительных материалах.

### Результаты и обсуждение

#### *Оптимизация условий получения наночастиц феррита никеля*

В данной работе с целью синтеза близких по размеру и морфологии ферритмагнитных наночастиц феррита никеля, подходящих для терапевтических приложений, был проведён поиск оптимальных реакционных параметров, для чего применили метод дробного факторного эксперимента (ДФЭ  $2^{7-4}$ ) – 1/16 реплики полного факторного эксперимента – позволяющий при существенном уменьшении числа опытов получить регрессионную модель, описывающую влияние на целевую функцию сразу семи факторов, характеризующих условия процесса.

В качестве целевой функции математической модели использовали гидродинамический диаметр частиц феррита никеля ( $d_{\text{гидр}}$ , нм), определенный методом фотонной корреляционной спектроскопии (данный метод является прямым методом определения размера частиц, а также менее материально затратным по сравнению с электронной микроскопией). В качестве независимых переменных выбрали следующие факторы ( $X_1$ – $X_7$ ): молярные концентрации ионов  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  (C);  $\text{NaOH}$  ( $C_{\text{NaOH}}$ ); отношение количества моль ЦТАБ к количеству моль ионов металлов ( $n(\text{CTAB}) / n(\text{Ni}^{2+} + \text{Fe}^{3+})$ ); pH осаждения; температура (T) и продолжительность ( $\tau$ ) синтеза; объем винной кислоты ( $V_{\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_3}$ ). Значения независимых переменных и уровни их варьирования приведены в табл. S1.

В работе использовалась стандартная матрица планирования ДФЭ  $2^{7-4}$  (табл. S2), знаки «+» и «-» в которой соответствуют верхнему и нижнему уровню варьирования данного фактора. При реализации ДФЭ провели три серии по 8 опытов, по результатам которых определили средние значения частных откликов ( $d_i$ , табл. S2), оценили ошибку воспроизводимости (дисперсию) каждого опыта. Обработка результатов велась в соответствии с [16]. Статистиче-

ский анализ результатов эксперимента проводили в программе STATISTICA DOE. Среднюю квадратичную ошибку и доверительный интервал определяли при вероятности, равной 0,95. В ходе анализа подтвердили однородность выборочных дисперсий, определили коэффициенты регрессии и порог их значимости ( $\Delta = 6$ ).

На основании полученных данных вывели математическую модель, описывающую зависимость гидродинамического диаметра частиц от исследованных факторов (все факторы оказались значимыми):

$$d_{\text{гидр.}} = 413 - 8X_1 + 13X_2 + 42X_3 - 12X_4 - 11X_5 + 11X_6 + 25X_7. \quad (1)$$

В наибольшей степени на гидродинамический диаметр полученных частиц влияют количество бромида цетилтриметиламмония ( $X_3$ ) и объём винной кислоты ( $X_7$ ). ЦТАБ использовали с целью стерической стабилизации коллоидной системы и получения более мелких и однородных зародышей твердой фазы [17]. Однако увеличение его количества привело к росту размера частиц, что, вероятно, связано с флокуляцией зародышей, вызываемой адсорбцией молекул высокомолекулярного соединения на поверхности нескольких частиц. Для формирования прекурсоров феррита никеля, имеющих стехиометрический состав, необходимо снизить скорость осаждения гидроксида железа [18], чего добивались, уменьшая активность ионов  $\text{Fe}^{3+}$  добавлением винной кислоты ( $\text{H}_2\text{Tart}$ ), образующей с ионами  $\text{Fe}^{3+}$  в условиях осаждения комплексы средней силы ( $\text{pK}([\text{Fe}(\text{OH})(\text{Tart})]) = 11,86$ ). Никель (II) также образует с тартрат-ионами комплекс ( $\text{pK} = 5,42$  [19]), однако он гораздо менее устойчив, чем комплекс железа. Как показала регрессионная модель, присутствие в системе винной кислоты не только обеспечило стехиометрию продукта, но и способствовало уменьшению диаметра частиц феррита никеля.

Меньшее влияние на гидродинамический диаметр  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  оказывали концентрации реагентов, pH, температура и продолжительность синтеза. Влияние этих факторов закономерно: меньшие кристаллиты формировались при более высоких концентрациях солей и небольшом времени синтеза, недостаточным для завершения процесса оствальдовского созревания.

В результате анализа полученной математической модели определили оптимальные реакционные параметры синтеза наночастиц феррита никеля методом щелочного соосаждения:  $\text{C}(\text{Ni}(\text{NO}_3)_2) = 0,4 \text{ M}$ ,  $\text{C}(\text{Fe}(\text{NO}_3)_3) = 0,8 \text{ M}$ ,  $\text{C}(\text{NaOH}) = 1 \text{ M}$ ,  $n(\text{ЦТАБ})/n(\text{Ni}^{2+} + \text{Fe}^{3+}) = 1/60$ ,  $\text{pH} = 10$ , температура  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , продолжительность синтеза 5 мин, объём 0,1 M винной кислоты – 1 мл). Эксперимент, проведенный в указанных условиях, позволяет говорить о практически полном осаждении исходных солей и получении прекурсора состава, соответствующего стехиометрии феррита (концентрации ионов  $\text{Ni}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  в маточных растворах после проведения синтеза не превышали  $10^{-6}$  моль/л).

На термограмме полученного осадка (рис. 1а, кривая ТГ) отчетливо видны 3 стадии разложения прекурсора: первая (до  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) обусловлена удалением молекулярно-сорбированной воды, а также, вероятно, частичной потерей химически связанной воды исходных гидроксидов; вторая стадия ( $200\text{--}350 \text{ }^\circ\text{C}$ ) характеризуется активным разложением гидроксидов, а также гидроксо-тартратных комплексов; выше  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  разлагаются примесные нитрат-ионы. По данным термического анализа, для термообработки выбрали температуру, соответствующую окончанию процессов разложения прекурсора –  $650 \text{ }^\circ\text{C}$ , и время 3 ч.

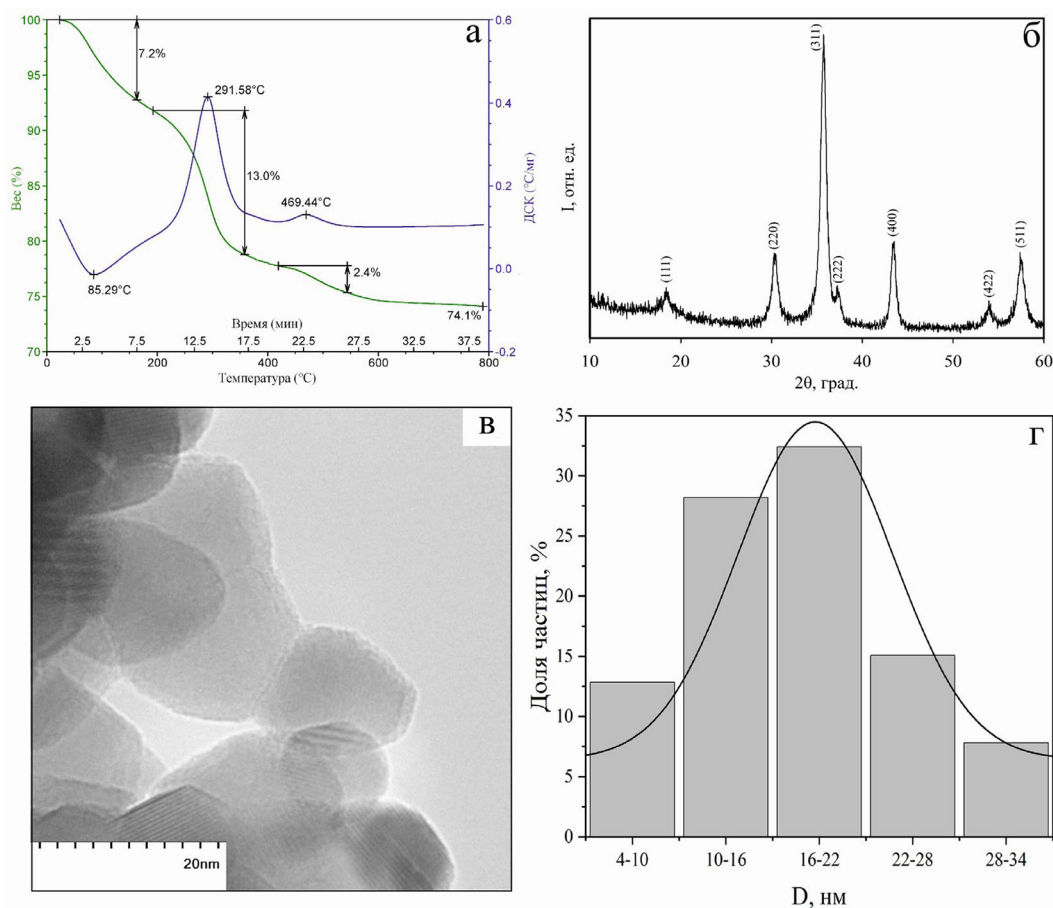


Рис. 1. Результаты термического исследования прекурсора феррита никеля (а); дифрактограмма (б); микрофотография ПЭМ (в) и диаграмма распределения по размерам (г) наночастиц феррита никеля, полученного в оптимальных условиях

Fig. 1. Results of thermal study of nickel ferrite precursor (a); diffraction pattern of X-rays (б); micrograph TEM (в) and particle size distribution (г) for nickel ferrite obtained under optimal conditions

Гидродинамический диаметр частиц, синтезированных в оптимальных условиях, составил  $222 \pm 15$  нм, а их дзета-потенциал равен  $-14,6$  мВ, что свидетельствует об умеренной электростатической стабилизации гидрозолей, вероятно, вызванной адсорбцией ОН-ионов. Как известно, гидродинамический диаметр обычно больше, чем реальный размер частицы, что связано с «налипанием» электрического дипольного слоя на поверхность диспергированной частицы при её движении в жидкой среде. Для определения реального размера частиц использовали методы РФА и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). По данным рентгенофазового анализа, образец является чистофазным ферритом никеля (рис. 1б). Размер области когерентного рассеяния, рассчитанный по формуле Шеррера (Дополнительные материалы (1)) для трёх наиболее интенсивных рефлексов ( $\langle 30,33 \rangle$ ;  $\langle 35,73 \rangle$ ;  $\langle 43,43 \rangle$ ), составил  $20 \pm 2$  нм. По данным ПЭМ (рис. 1в), частицы  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  имеют морфологию, близкую к сферической, а их распределение по размерам (рис. 1г) подчиняется закону Гаусса. Средний размер частиц  $18,0 \pm 0,8$  нм.

### Оптические и электронные свойства

Для изучения оптических и электронных свойств  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  использовали гидрозоль наночастиц. На ЭСП (рис. 2а) наблюдается широкая область поглощения в интервале от 300 до 700 нм с максимумом при 325 нм, связанная с тремя разрешенными для ионов никеля (II) в октаэдрическом окружении электронными переходами ( ${}^3A_{2g} \rightarrow {}^3T_{2g}({}^3F)$ ,  ${}^3A_{2g} \rightarrow {}^3T_g({}^3F)$ ,  ${}^3A_{2g} \rightarrow {}^3T_g({}^3P)$  [20]). Полученные спектры хорошо согласуются с опубликованными ранее [21–22]. Для оценки ширины запрещенной зоны  $E_g$  феррита никеля ЭСП в области 200–700 нм обработали в координатах

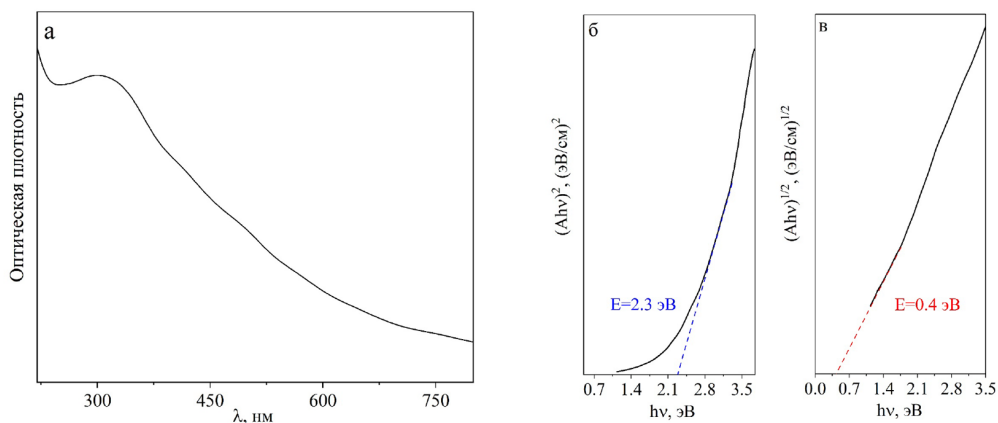


Рис. 2. Электронный спектр поглощения (а); графики Тауца для определения ширины запрещенной зоны феррита никеля: прямой переход (б) и непрямого перехода (в)

Fig. 2. Electronic absorption spectra (a); Tauc plot for (b) direct and (c) indirect band gap energies of nickel ferrite nanoparticles

Тауца для прямых (зависимость  $(\alpha hv)^2 = f(hv)$ ) и не прямых ( $(\alpha hv)^{1/2} = f(hv)$ ) оптических переходов (рис. 2б, в). Рассчитанные значения ширины запрещенной зоны (2,3 эВ для прямого перехода) и 0,4 эВ (для непрямого перехода) совпадают с некоторыми литературными данными. Следует отметить, что представленные в литературе экспериментально найденные значения  $E_g$  для  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  лежат в широком интервале (от 0,9 до 5 эВ), что, как сообщают М. Meinert и G. Reiss [23], связано с тем, что обычно используемые для определения ширины запрещенной зоны графики Тауца не подходят для этого материала вследствие особенностей его зонной структуры (верх валентной зоны в основном представлен состояниями Ni и O, а низ зоны проводимости – состояниями Fe и O, волновые функции которых не перекрываются). Эти особенности электронного строения феррита никеля приводят к образованию при поглощении света нестабильных пространственно разделенных электрон-дырочных пар (экситонов Ванье-Мотта) с низкой энергией связи, а, следовательно, с коротким временем жизни, вследствие чего чистый  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  едва ли будет хорошим фотокатализатором, несмотря на подходящую величину  $E_g$ .

### Магнитные свойства

Как известно, намагниченность  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  обусловлена ионами  $\text{Ni}^{2+}$  в октаэдрических позициях ( $\mu=2,83$  мБ), тогда как спины ионов  $\text{Fe}^{3+}$  ( $\mu=5,92$  мБ), равномерно распределенных

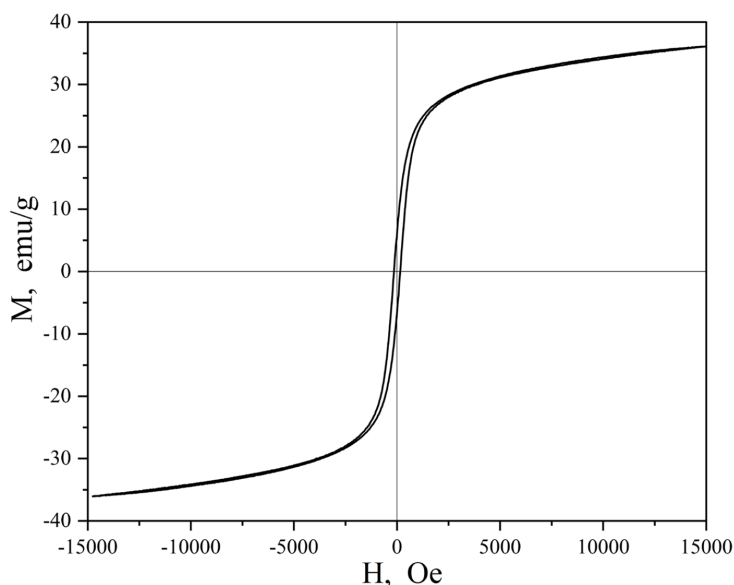


Рис. 3. Зависимость намагниченности наночастиц феррита никеля, полученного в оптимальных условиях, от величины приложенного магнитного поля

Fig. 3. The magnetization function of nickel ferrite nanoparticles obtained under optimal conditions depends on the magnitude of the magnetic field

между тетраэдрическими и октаэдрическими позициями, взаимодействуют антиферромагнитно [24]. Удельные кривые намагничивания полученных наночастиц при 300 К типичны для магнитомягкого материала и указывают на гистерезисный ферримагнетизм (рис. 3). Намагниченность насыщения ( $M_s$ ), остаточная намагниченность ( $M_r$ ) и коэрцитивная сила ( $H_c$ ) составили 35 эму/г, 6,3 эму/г и 167 Э соответственно. Уменьшение величины  $M_s$  по сравнению с объемным материалом (57 эму/г) [24, 25] характерно для наноматериалов и связано с нарушением магнитного порядка в поверхностном слое частиц, в котором магнитные моменты атомов проявляют спин-стекольное поведение [26]. Как правило, толщина этого слоя («мертвый» слой) составляет доли нанометра (одна-две постоянных решетки), и при размере частиц несколько нанометров это может приводить к значительному снижению намагниченности насыщения.

В табл. S3 представлены полученные в данной работе, а также приведенные в литературе значения  $M_s$ ,  $M_r$  и  $H_c$ , демонстрирующие их широкую варибельность в зависимости от использованного метода синтеза и условий термообработки прекурсоров. В частности, увеличение температуры прокаливания способствует миграции ионов железа из тетраэдрических в вакантные октаэдрические позиции, что приводит к возрастанию намагниченности нанокристаллов. Кроме того, наблюдается сильная зависимость магнитных свойств от размера зерна, что обычно объясняется изменениями обменного взаимодействия между тетраэдрическими и октаэдрическими подрешетками [24]. Однако для наночастиц ферритов следует учитывать и другие явления: сверхобменное взаимодействие (через мостиковый атом кислорода), магнитокристаллическую анизотропию, перекокс вращения спинов (отклонение спина на небольшой угол от оси вращения) и проч. [24, 26].



С другой стороны, изменение  $H_c$  и  $M_r$  с размером частицы можно объяснить на основе доменной структуры [26–27]. При уменьшении размера многодоменной частицы подвижность доменных стенок сильно уменьшается, в частности, вследствие их взаимодействия с магнитными несовершенствами материала (дефектами кристаллической решетки), что приводит к росту коэрцитивной силы. При достижении частицей однодоменного размера (критический размер  $D_{cr}$ ) её коэрцитивная сила становится максимальной –  $H_{c_{max}}$ . При дальнейшем уменьшении размера частиц  $< D_{cr}$  происходит снижение коэрцитивной силы и остаточной намагниченности, а также (при достижении характерного размера  $d_s$ ) переход вещества в однодоменное суперпарамагнитное состояние. В работе [25] произведен приблизительный расчет величин  $D_{cr}$  и  $d_s$  для  $NiFe_2O_4$ , которые составили 151 и 25,7 нм соответственно. На основании данных табл. S3 построены зависимости коэрцитивной силы (рис. S1 а) и остаточной намагниченности (рис. S1 б) феррита никеля от размера его частиц, которые подтверждают рассчитанные значения  $D_{cr} \approx 100\text{--}150$  нм и  $d_s \approx 20$  нм. При уменьшении размера зерна ниже критического наблюдается резкое снижение остаточной намагниченности наноматериала, что позволяет управлять магнитными свойствами частиц феррита никеля, контролируя их размер подбором условий химического соосаждения.

### Заключение

В данной работе для получения магнитных терапевтических наночастиц феррита никеля использовался простой, быстрый и легко масштабируемый подход – щелочное соосаждение ионов  $Fe^{3+}$  и  $Ni^{2+}$ . Методом математического планирования и обработки результатов эксперимента (ДФЭ 2<sup>7-4</sup>) изучено влияние реакционных параметров на размер образующихся наночастиц и подобраны оптимальные условия, в которых, по данным рентгенофазового анализа, получен чистофазный феррит никеля. Установлено, что наночастицы, синтезированные в оптимальных условиях, отличаются однородностью фазового и гранулометрического состава, имеют близкую к сферической форму и средний размер  $18,0 \pm 0,8$  нм.

Ширина запрещенной зоны образца составила 2,3 эВ для прямого перехода и 0,4 эВ для непрямого перехода. Показано, что синтезированные наночастицы  $NiFe_2O_4$  обладают низкой коэрцитивной силой (167 Э), характерной для магнитомягких материалов, и  $M_s \sim 35$  эму/г. Определенные значения остаточной намагниченности (6,3 эму/г) и коэрцитивной силы позволяют рассматривать полученные частицы феррита никеля как перспективный материал для терапевтического применения.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Дополнительные материалы / Application



## Список литературы / References

- [1] Goranov V. Biomaterials functionalized with magnetic nanoparticles for tissue engineering: Between advantages and challenges. *Biomaterials and Biosystems* 2024. 15, 100100.
- [2] Tudisco C., Cambria M. T., Sinatra F. Multifunctional magnetic nanoparticles for enhanced intracellular drug transport. *Journal of Materials Chemistry B* 2015. 3(20), 4134–4145.
- [3] Mozhdehbakhsh Mofrad Y., Asiaei S., Shaygani H., Salehi S.S. Investigating the effect of magnetic field and nanoparticles characteristics in the treatment of glioblastoma by magnetic hyperthermia method: An in silico study. *Results in Engineering* 2024. 23, 102473.
- [4] Li Y., Gao N. Decorated of silver nanoparticles over Arabic gum modified magnetic nanoparticles: Evaluation of its antioxidant and its therapeutic effects on cervical cancer. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices* 2024. 9(4), 100774.
- [5] Rarokar N., Yadav S., Saoji S. Magnetic nanosystem a tool for targeted delivery and diagnostic application: Current challenges and recent advancement. *International Journal of Pharmaceutics: X*. 2024. 7, 100231.
- [6] Martinson K.D., Cherepkova I.A., Pantelev I.B., Popkov V.I. Single-Step Solution-Combustion Synthesis of Magnetically Soft NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanopowders with Controllable Parameters. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis* 2019. 28(4), 266–270.
- [7] Kurtan U., Güngüneş H., Sözeri H., Baykal A. Synthesis and characterization of monodisperse NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. *Ceramics International* 2016. 42(7), 7987–7992.
- [8] Mana R. Physical Properties of Nickel Ferrite Nanoparticles at different annealing temperature prepared by Sol-Gel Technique. *Materials Today: Proceedings* 2019. 18, 1753–1759.
- [9] Zhang S. Jiang W., Li Y., Yang X., Sun P., Liu F., Yan X., Gao Y., Liang X., Ma Jn, Lu G. Highly-sensitivity acetone sensors based on spinel-type oxide (NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) through optimization of porous structure. *Sensors and Actuators B: Chemical* 2019. 291, 266–274.
- [10] Saikova S.V., Nemkova D.I., Pikurova E.V., Samoilo A.S. Anion-Exchange Resin Precipitation of Nickel Ferrite Nanopowders Modified by Plasmonic Particles. *Russian Journal of Inorganic Chemistry* 2023, 68(8), 1011–1020.
- [11] Saykova S.V., Nemkova D.I., Krolikov A.E., Samoylo A.S. Determination of optimal conditions for the synthesis of superparamagnetic nickel ferrite nanoparticles without calcination step. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry* 2024. 17(1), 151–161.
- [12] Hassan A. Nanocrystalline Zn<sub>1-x</sub>Co<sub>0.5x</sub>Ni<sub>0.5x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Ferrites: Fabrication via Co-Precipitation Route with Enhanced Magnetic and Electrical Properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2015. 393, 56–61.
- [13] Velmurugana K. Synthesis of nickel zinc iron nanoparticles by coprecipitation technique. *Materials Research* 2010. 13, 299–309.
- [14] Joshi S. Structural, magnetic, dielectric and optical properties of nickel ferrite nanoparticles synthesized by co-precipitation method. *Journal of Molecular Structure* 2014. 1076, 55–62.
- [15] Nemkova D.I. Saikova S.V., Krolikov A.E. Pikurova E.V. Optimisation of nickel ferrite production conditions for the preparation of magnetic composite photocatalysts. *Journal of Inorganic Chemistry* 2024. 3, 1–8.
- [16] Nemkova D., Saikova S., Krolikov A. Effect of Amino Acids on the Synthesis of NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> /Au Hybrid Nanoparticles. *Crystals* 2025. 15, 72.

- [17] Trofimova T. V., Saykova S. V., Saykova D. I., Chistyakov D. I. Synthesis of gold nanoparticles with anisotropy properties. *Journal of the Siberian Federal University. Series: chemistry* 2016. 9(4), 496–503.
- [18] Trofimova T. V., Saikova S. V., Panteleeva M. V. Anion-Exchange Synthesis of Copper Ferrite Powders. *Glass and ceramics* 2018. Vol.75, P. 74–79.
- [19] Lurye A. A. Chromatographic materials (reference book). Moscow: Chemistry, 1973. 355.
- [20] Li L., Shi X., Cherice M., Evans L., Gary L. Atomic and Molecular Low-n Rydberg States in Near Critical Point Fluids, *Adv Asp Spectrosc* 2012. 16, 450–482.
- [21] Sharifi S., Yazdani A., Rahimi K. Incremental substitution of Ni with Mn in NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> to largely enhance its supercapacitance properties, *Scientific Reports* 2020. 10, 1–15.
- [22] Pashkov G. L., Saikova S. V., Panteleeva M. V. Anion-Exchange Synthesis of Nickel-Containing Spinel-Type Pigments. *Glass Ceram* 2014. 71, 57–59.
- [23] Meinert M., Reiss G., Electronic structure and optical band gap determination of NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. *Journal of Physics: Condensed Matter* 2014. 26, 1–4.
- [24] Nathani H., Gubbala S., Misra R. D. K., Mater J. Magnetic Behavior of Nanocrystalline Nickel Ferrite: Part I. The Effect of Surface Roughness. *Materials Science and Engineering: B* 2005. 121(1), 126–136.
- [25] Kodama R. H., Berkowitz A. E., McNiff Jr. E. J., Foner S. Surface Spin Disorder in NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles. *Physical Review Letters* 1996. 77(2), 394–397.
- [26] Bushkova V. S. Low-temperature magnetic properties of ferrites NiCr<sub>x</sub>Fe<sub>2-x</sub>O<sub>4</sub>. *Low Temperature Physics* 2017. 43(12), 1724–1732.
- [27] Alarifi A., Deraz N. M., Shaban S. Structural, morphological and magnetic properties of NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nano-particles. *Journal of Alloys and Compounds* 2009. 486(1–2), 501–506.