

Синтез и магнитные свойства магнитных жидкостей на основе наночастиц $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$

С. Э. Киргизов,^{1,*} О. К. Кувандиков,¹ Д. Х. Имамназаров¹

¹Самаркандский государственный университет имени Шарофа Рашидова,

Институт инженерной физики, кафедра общей физики

Узбекистан, 140104, Самарканд, Университетский бульвар, д. 15

(Поступила в редакцию 27.04.2024; после доработки 30.05.2024; подписана в печать 31.05.2024)

Методом химического соосаждения получены магнитные наночастицы $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ с $x = 0, 0.25, 0.5, 0.75$ и синтезированы магнитные жидкости на их основе. Выполнены структурный и фазовый анализы полученных наночастиц, определены характерные размеры наночастиц и дисперсия по размерам, намагниченность магнитных жидкостей с содержанием 0.5 объемных магнитных наночастиц. Дифрактограммы всех составов подтверждают образование однофазной структуры кубической шпинели NiFe_2O_4 и CoFe_2O_4 . Средние диаметры частиц, определенные с помощью просвечивающего электронного микроскопа, составляют 17.2, 15.0, 14.6, 11.1 нм при $x = 0, 0.25, 0.5, 0.75$ соответственно. Намагниченность насыщения изготовленных на основе наночастиц $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ магнитных жидкостей уменьшается с 38.25 эме/кг до 5.33 эме/кг при уменьшении концентрации кобальта от $x = 0.75$ до $x = 0$. Если при $x = 0, 0.25$ и 0.5 магнитные жидкости характеризуются суперпарамагнитными свойствами, то для жидкостей на основе $\text{Co}_{0.75}\text{Ni}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ обнаружена широкая петля гистерезиса с коэрцитивной силой $H_C = 612$ Э, что связывается с однодоменным состоянием частиц $\text{Co}_{0.75}\text{Ni}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_4$, несмотря на их малый размер.

PACS: 75.90.+w УДК: 537.623

Ключевые слова: магнитная жидкость, наночастица, рентгеноструктурный анализ, намагниченность.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.79.2450503](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.79.2450503)

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы значимость магнитных жидкостей (МЖ) значительно возросла, поскольку внешнее магнитное поле позволяет управлять их оптическими, механическими и другими свойствами [1, 2]. МЖ используются в различных областях, таких как фильтры в оптике [3], умные зеркала [4], датчики [5], устройства хранения энергии [6] и искусственный интеллект [2]. Обычно МЖ состоят из магнитных наночастиц, поверхностно-активных веществ и диспергаторов [7]. Другими словами, МЖ представляют собой стабильные коллоидные суспензии магнитных наночастиц в подходящей жидкой среде. Fe_3O_4 в МЖ широко исследовался в качестве частицы наполнителя благодаря своей химической стабильности, воздействию внешнего магнитного поля и фотокаталитической активности. Частицы Fe_3O_4 часто модифицируются ионами переходных металлов для улучшения физических свойств МЖ, а также их потенциального применения. Например, замещение Mn в структуре Fe_3O_4 улучшило фотокаталитические свойства и магнитное насыщение, что позволяет использовать новый материал в медицинских сенсорах и средствах доставки лекарств [8]. Аналогично добавление Zn к Fe_3O_4 повышало биосовме-

стимость его наночастиц, тем самым увеличивая однородность дисперсии [9].

Добавление к Fe_3O_4 различных металлов обеспечивает проявление широкого спектра свойств. Например, МЖ на основе элементов смешанной группы железа $\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ проявляют различные магнитные и магнитооптические свойства [10]. Определены структура, магнитные и антибактериальные свойства МЖ на основе $\text{Mn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ [11]. Жидкости на основе $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ синтезированы различными методами и определена их структура [12]. МЖ на основе CoFe_2O_4 и NiFe_2O_4 представляют собой материалы с различной морфологической структурой, магнетизмом и другими свойствами и широко используются на практике [13, 14]. Поэтому получение феррожидкостей на основе ферритов, содержащих как Co, так и Ni, открывает возможности для широкого их применения. Приготовление МЖ — нетрадиционная задача для исследователей и производителей. Магнитные свойства феррожидкостей в первую очередь определяются содержанием в них магнитных частиц. Поэтому приготовление магнитных наночастиц является основной задачей при формировании МЖ.

Методы синтеза магнитных частиц МЖ, такие как соосаждение, гидротермальный, золь-гель, термическое разложение и другие, получили широкое распространение в зависимости от экономической эффективности и конкретного применения ча-

* E-mail: qirgizovsobit94@gmail.com

стиц [15, 16]. Наночастицы ферритов чрезвычайно малого размера могут быть синтезированы путем химического соосаждения [17]. В настоящей работе методом химического соосаждения были синтезированы наночастицы $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0, 0.25, 0.5, 0.75$).

Исключительные магнитные свойства ферритовых наночастиц делают их незаменимыми для многих применений, таких как носители магнитной записи высокой плотности, микроволновые устройства и устройства памяти. Феррит кобальта широко известен как магнитотвердый материал, обладающий высокой коэрцитивной силой и средней намагниченностью, тогда как феррит никеля является магнитомягким материалом [18]. Исследования показали, что ферритовые частицы с общей формулой $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ имеют суперпарамагнитную природу при размерах 15–20 нм [19, 20]. Кристаллическая структура $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ представляет собой кубический шпинель-феррит с пространственной группой 3d (Co, Ni) [21]. Эксперименты показали, что увеличение концентрации ионов Co в $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ существенно влияет на их физические свойства в целом [22]. Суперпарамагнитные свойства наночастиц феррита зависят от формы, размера и чистоты частиц. Эти свойства также зависят от исходных параметров, выбранных в процессе синтеза наночастиц, способных изменить последующую наноструктуру материала [23].

Магнитные свойства феррожидкостных систем интересны не только с точки зрения развития широкого спектра приложений, но и с фундаментальной точки зрения [24–26]. Исследование системы взаимодействующих наночастиц и кластеров позволяет изучить влияние конечного размера составляющих частиц на свойства материала. Известно, что МЖ проявляют суперпарамагнитные свойства при комнатной температуре и петля гистерезиса либо не существует, либо чрезвычайно узкая [27–29], но появляется при низких температурах [30]. Формирование высокой коэрцитивной силы в МЖ на основе

наноразмерных частиц феррита имеет большое значение для их применения.

Целью данной исследовательской работы является синтез магнитных наночастиц $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ и МЖ на их основе, изучение кристаллической структуры, морфологии, элементного состава наночастиц и намагниченности МЖ с различной концентрацией наночастиц.

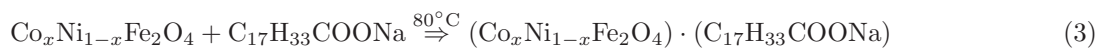
1. ПОЛУЧЕНИЕ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе приготовления МЖ были получены наночастицы $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ с различными концентрациями ионов кобальта $x = 0, 0.25, 0.5, 0.75$. Магнитные наночастицы были синтезированы методом химического соосаждения. Каждая из солей $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ с мольным соотношением $\text{Co}^{2+} : \text{Ni}^{2+} : \text{Fe}^{3+} : x : (1-x) : 2$ растворялась отдельно в 100 мл дистиллированной воды. Полученные продукты (или растворы) вместе перемешивают при температуре 60°C с помощью магнитной мешалки в течение 30 мин. Этот процесс осуществляется при нормальных атмосферных условиях. Далее нагревали растворы до температуры $65 - 70^\circ\text{C}$ при постоянном перемешивании и объединяли, пропуская через фильтр. Кипящий раствор, состоящий из гидроксида натрия NaOH в количестве 8 моль, растворенного в 1 л дистиллированной воды, добавляли капельным методом в вышеуказанный раствор до достижения pH около 12 в течение 10 с при постоянном перемешивании. Раствор выдерживали при 95°C в течение 1 ч, тогда осаждение и образование ферритов происходило путем превращения солей металлов в гидроксиды, которое происходило сразу, с последующим превращением гидроксидов в ферриты. Уравнение реакции имеет следующий вид:



Феррочастицы собирали с помощью магнитной сепарации и несколько раз промывали дистиллированной водой для удаления примесей. Частицы осадка отфильтровывали и при перемешивании до-

бавляли в качестве ПАВ олеат натрия до образования вязкой и густой смеси. Смесь перемешивали при 80°C , где наночастицы, покрытые олеатом натрия, образуются по следующему уравнению:



Образцы наночастиц сушили в печи при 100°C в течение 12 ч до готовности магнитных частиц. Для получения объемной концентрации 0.5 МЖ были использованы весы с точностью измерений 1 мг, которые дают возможность измерить массу,

соответствующую объёму 99.5 мл дистиллированной воды, а также измерить массу, соответствующую объёму 0.5 мл, с учетом плотности частицы MFe_2O_4 ($\text{M}=\text{Ni}, \text{Co}$). Затем добавляли феррочастицы в дистиллированную воду и перемешивали при

80°C в течение 1 ч. Полученные феррожидкости на основе частиц $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0, 0.25, 0.5, 0.75$) имеют разные цвета.

Структурный и фазовый анализы порошковых образцов Co–Ni оксида феррочастиц изучали с помощью дифрактометра XRD AOLONG AL27-MINI (CuK α -излучение, $\lambda = 0.154$ нм, для значений 2θ от 10° до 80°). Уравнение Шеррера используется для определения размеров наночастиц феррита. Морфологию и размер наночастиц МЖ исследовали с помощью просвечивающего электронного микроскопа (модель JEM-2100 Plus JEOL). Намагниченность образцов измеряли с помощью вибрационного магнитометра при комнатной температуре.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Рентгеноструктурный анализ

На рис. 1 представлены рентгеноструктурные спектры всех синтезированных $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ферритов с концентрациями $x = 0, 0.25, 0.5, 0.75$. Структура и фазовая чистота полученного продукта подтверждены анализом рентгенограмм порошка. Дифрактограммы всех составов подтверждают образование однофазной структуры кубической шпинели NiFe_2O_4 .

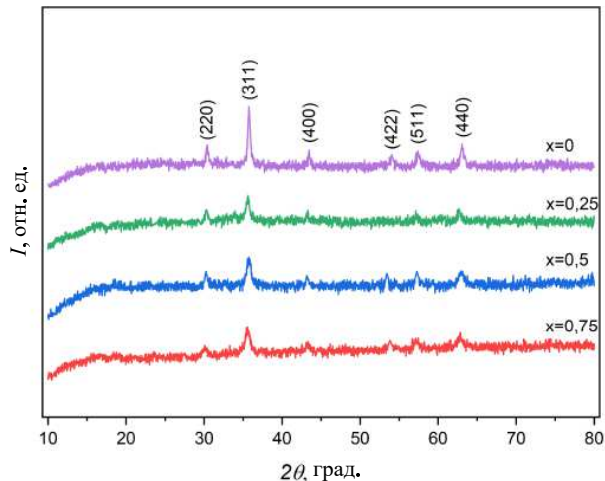


Рис. 1. Рентгеноструктурный анализ наночастиц $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$

Постоянные решетки a определяется по данным рентгеноструктурного анализа с использованием программного обеспечения Powder-x [31]. Все образцы имеют полиориентированную структуру с несколькими пиками, характерными для кристаллических плоскостей 220, 311, 400, 422, 511 и 440, соответствующих монокубической фазе $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$. Уширение пиков рентгеновской дифракции для приготовленного образца объясняется дисперсией размеров нанокристаллических частиц [32, 33]. Отсутствие каких-либо дополнительных пиков, связанных с примесями, свидетель-

ствует о высокой чистоте наших образцов никель-кобальтовых ферритов. Размеры нанокристаллов оцениваются по рентгеновским спектрам с использованием уравнения Дебая–Шеррера [33]:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos(\theta)}, \quad (4)$$

где λ — длина волны рентгеновского излучения, K — константа, принятая равной 0.89, β — полная ширина на полувысоте уширения линии, а θ — угол дифракции. Наиболее интенсивный пик (311) используется для оценки размеров нанокристаллов $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ и находится в диапазоне 10.6–16.9 нм (таблица). Наши наночастицы намного меньше по сравнению с теми, о которых сообщалось ранее (25–30 нм и 18–23 нм) [33, 34], что позволяет обеспечить лучшее соотношение сигнал–шум в порошках для магнитной записи.

Постоянная решетки (a), объем ячейки (V) и плотность (ρ) рассчитывались по спектрам XRD с использованием следующих соотношений:

$$a = \sqrt{d^2(h^2 + k^2 + l^2)}, \quad (5)$$

$$v = a^3, \quad (6)$$

$$\rho_x = \frac{8M}{Na^3}, \quad (7)$$

где M — молекулярная масса, N — число Авогадро. В таблице приведены данные, показывающие монотонное приращение параметра решетки при увеличении содержания Co, подчиняющееся закону Vegarda [34]. Это связано с меньшим ионным радиусом Ni^{2+} (0.69 Å) по сравнению с Co^{2+} (0.74 Å). Рассчитанный средний параметр решетки $a = 8.3$ Å соответствует значению JCPDS. Значения плотности образцов, определяемые по рентгенограмме, суммированы в таблице. Плотность наночастиц уменьшается с увеличением постоянной решетки, как и ожидалось.

2.2. Электронно-микроскопические исследования

Форму, размер и морфологию наночастиц образцов $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0, 0.25, 0.5, 0.75$) исследовали с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ). По ПЭМ-изображениям построены диаграммы распределения диаметров наночастиц. Полученные результаты представлены на рис. 2. По данным ПЭМ следует, что практически все частицы образцов имеют сферическую форму. Анализы ПЭМ-изображений и гистограммы размеров частиц показали, что диаметр наночастиц увеличивается с увеличением концентрации никеля. Средние размеры частиц составляют 17.2, 15.0, 14.7, 11.2 нанометров при концентрации $x = 0, 0.25, 0.5, 0.75$ соответственно. По полученным результатам установлено, что среднее значение диаметров частиц, полученное по ПЭМ, практически совпадает с значениями, рассчитанными по рентгеноструктурному анализу.

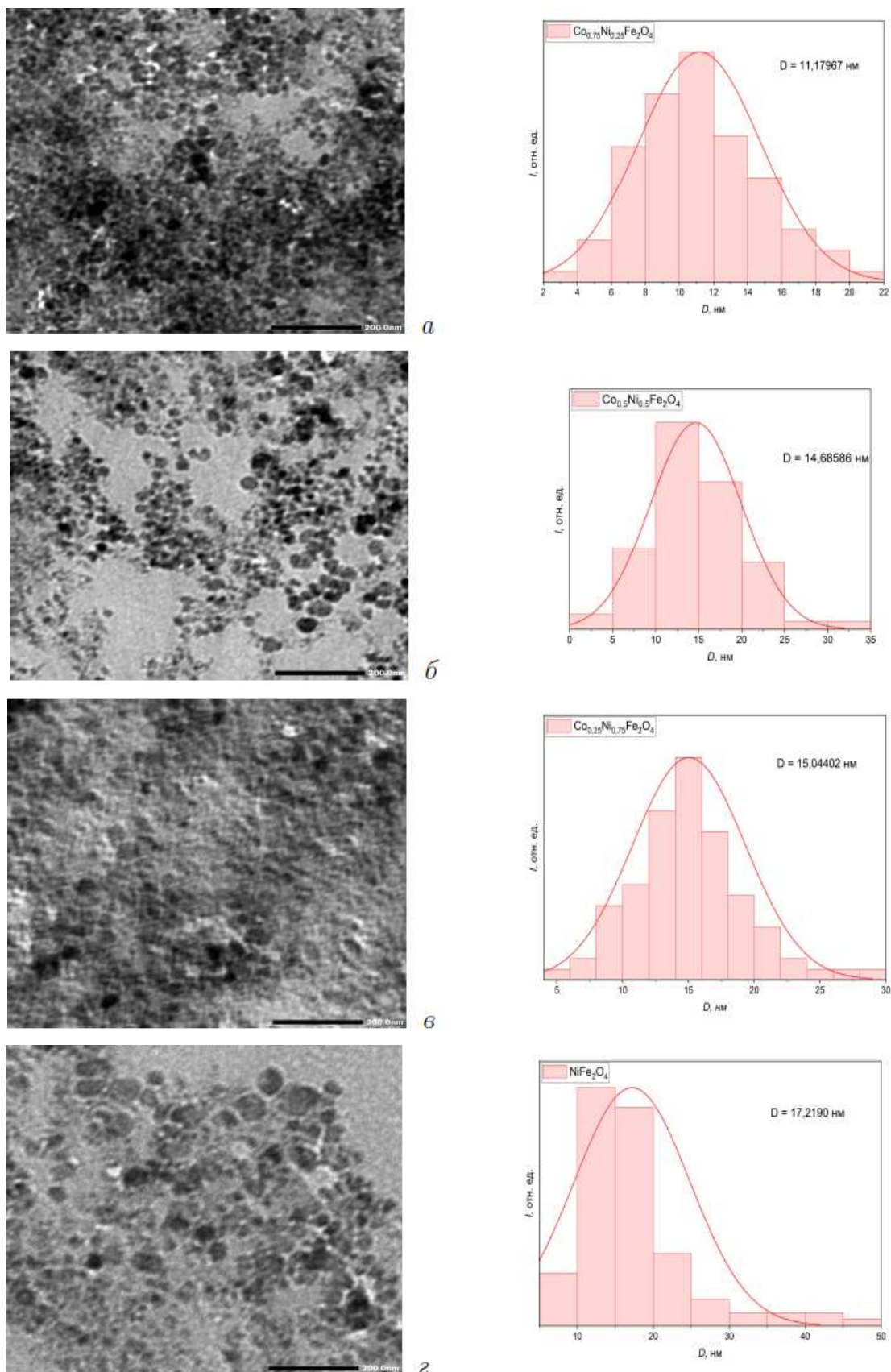


Рис. 2. ПЭМ-изображения и гистограммы размеров частиц $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$: а — $x = 0.75$, б — $x = 0.50$, в — $x = 0.25$ и г — $x = 0$

Таблица.

Образец	D_{XRD} нм	a Å	Среднее a Å	V Å ³	ρ_{XRD} г·см ⁻³	$D_{ПЕМ}$ нм	M_s эме/кг
NiFe ₂ O ₄	16.9	8.30		571.8	5.45	17.2	5.33
Co _{0.25} Ni _{0.75} Fe ₂ O ₄	14.4	8.31	8.33±0.03	574.5	5.43	15.04	12.65
Co _{0.5} Ni _{0.5} Fe ₂ O ₄	13.2	8.33		577.4	5.40	14.7	23.64
Co _{0.75} Ni _{0.25} Fe ₂ O ₄	10.6	8.36		584.7	5.33	11.2	38.25

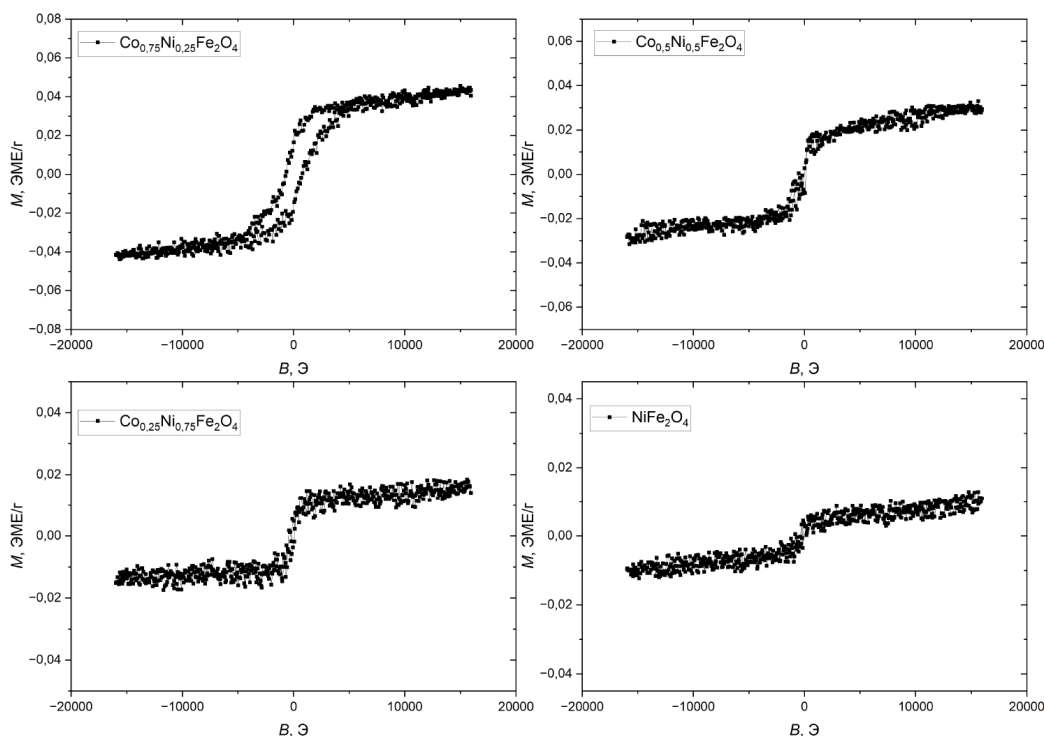


Рис. 3. Зависимость намагниченности от магнитного поля Co–Ni феррожидкостей

2.3. Магнитные свойства

Зависимость удельной намагниченности МЖ на основе наночастиц $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0.75, 0.5, 0.25, 0$) от магнитного поля измерялась при комнатной температуре. Результаты измерений представлены на рис. 3. Как видно из рис. 3, намагниченность образцов возрастает с увеличением магнитного поля и проявляет тенденцию к насыщению в сильных полях. Достигнутую в поле 16 кЭ максимальную намагниченность можно считать намагниченностью насыщения M_s , значения которой представлены в таблице, так как линейный парамагнитный вклад жидкости без магнитных наночастиц достаточно мал. Намагниченность насыщения полученных МЖ уменьшается с 38.25 эме/кг до 5.33 эме/кг с увеличением концентрации никеля. Это хорошо соответствует изменению намагниченности ферритов при замещении ионов Co на ионы никеля.

Петля магнитного гистерезиса не наблюдалась при значениях концентрации $x = 0, 0.25, 0.5$, одна-

ко при концентрации $x = 0.75$ обнаружена широкая петля магнитного гистерезиса с коэрцитивной силой, достигающей 612 Э. Следовательно, в последнем случае частицы находятся заведомо не в суперпарамагнитном состоянии, несмотря на их малый средний размер (см. таблицу). Это явление может быть связано со следующими причинами. Во-первых, хотя размер однодоменности для сферических наночастиц кобальта оценивается в разных работах в диапазоне 15–70 нм, а для никеля в окрестности 45 нм и более [35], эти значения сильно зависят от формы частицы, состояния ее поверхности, дефектов, неоднородностей, механических деформаций и окружающей среды [35]. Все эти факторы влияют на магнитную анизотропию частиц, определяя ее магнитное поведение. Поэтому можно ожидать, что в нашем случае размер однодоменности для частиц CoFe_2O_4 не превышает 15 нм. Второй причиной является достаточно широкое распределение частиц по размерам (см. рис. 2), при котором в ансамбле наночастиц могут присутствовать как суперпарамагнитные частицы, так и ча-

стицы диаметром, превышающим размер однодоменности. Наконец, нельзя полностью исключить и агрегирование небольшой доли наночастиц, хотя этот процесс и маловероятен в сильно разбавленной магнитной жидкости. Хорошо известно, что коэрцитивная сила наночастиц велика для однодоменных частиц, но быстро уменьшается по мере уменьшения или увеличения размера частиц [35]. Это позволяет объяснить большую величину коэрцитивной силы МЖ при $x = 0.75$, когда наночастицы имеют размер близкий к однодоменности, и сильное уменьшение коэрцитивной силы (практически до нулевых значений) при уменьшении размера частиц при $x = 0, 0.25$ и 0.5 . Кроме того, коэрцитивная сила никелевых ферритов меньше, чем кобальтовых ферритов, что также способствует уменьшению коэрцитивной силы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом химического соосаждения получены магнитные жидкости на основе $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$, синтезированные при различных концентрациях кобальта. На основании рентгеноструктурного анализа подтверждено, что синтезированные частицы представляют собой шпинель структуры $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ферритов. При рентгеноструктурном анализе размер синтезированных порошковых образцов рассчитывали по уравнению Дебая–Шер-

рера. Расчеты показывают, что с увеличением содержания Ni в наночастицах $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ размеры наночастиц увеличиваются от 10.6 нм ($\text{Co}_{0.75}\text{Ni}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_4$) до 17.2 нм (NiFe_2O_4).

ПЭМ-изображения образцов показали, что синтезированные образцы имели сферическую форму. Согласно гистограммам распределения наночастиц по размерам было установлено, что средний диаметр частиц для образцов с концентрациями $x = 0.75, 0.5, 0.25, 0$ составляет 11.2, 14.7, 15.0, 17.2 нанометров соответственно. Значения размеров наночастиц, полученные по ПЭМ-изображениям и рассчитанным по рентгеновской структуре, хорошо коррелируют друг с другом.

Намагниченность насыщения изготовленных на основе наночастиц $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ магнитных жидкостей с объемной концентрацией наночастиц 0.5% уменьшается с 38.25 эме/кг до 5.33 эме/кг при уменьшении концентрации кобальта от $x = 0.75$ до $x = 0$. Если при $x = 0, 0.25$ и 0.5 магнитные жидкости характеризуются суперпарамагнитными свойствами, то для жидкостей на основе $\text{Co}_{0.75}\text{Ni}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ обнаружена широкая петля гистерезиса с коэрцитивной силой $H_C = 612$ Э, что связывается с однодоменным состоянием частиц $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$, несмотря на их малый размер.

Авторы выражают благодарность профессору Н. С. Перову и Л. А. Макаровой за измерение намагниченности образцов.

- [1] Yongqian L., Hao Z., Zhi Y. et al. // *Optik – Inter. Jour. Light and Elect. Optics.* **172.** 730. (2018).
- [2] Sohail A., Fatima M., Ellahi R., Akram K.B. // *J. Mol. Liq.* **285.** 47. (2019).
- [3] Lin W., Liu B., Zhang H. et al. // *IEEE Photonics Technol. Lett.* **27.** 2339. (2015).
- [4] Yoon J.S., Hyung G.L., Jun S.Y. et al. // *RSC Adv.* **11.** 523. (2021).
- [5] Deng M., Huang C., Liu D.H. et al. // *Opt. Express.* **23.** 20668 (2015).
- [6] Grosu Y., Faik A., Fernandez I.O. and Aquanno B.D. // *Sol. Energy Mater. Sol. Cel.* **161.** 170. (2017).
- [7] Taketomi S. and Tokadzumi S.. *Magnetic Fluids*, Moscow: Mir, 1993.
- [8] Brollo M.E.F., Flores P.H., Gutierrez L. et al. // *Phys. Chem. Chem. Phys.* **20.** 17829. (2018).
- [9] Hakim L.F., Portman J.L., Casper M.D. and Weimer A.W. // *Powder Technol.* **160.** 149. (2005).
- [10] Karthick R., Ramachandran K., Srinivasan R. // *Nanosystems: phys., chem., math.* **7,** N 4. 624. (2016).
- [11] Blessy B., Deepalekshmi P., Swapna S.N. et al. // *Jour. of Miner. Metall. Mater.* **30,** N 7. 1417. (2023).
- [12] Jyotsnendu G., Pallab P., Vaibhav S. et al. // *J. Magn. Magn. Mater.* **320.** 724. (2008).
- [13] Ahmad T., Rosy E.S., Defi Y. // *Jour. of King Saud Univ. – Scien.* **32.** 3032. (2020).
- [14] Sousaa M.H., Hasmonayb E., Depeyrotc J. // *J. Magn. Magn. Mater.* **242.** 572. (2002).
- [15] Соколовская Ю. Г., Подымова Н. Б., Карабутов А. А. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* № 4. 58. (2020). (Sokolovskaya Y. G., Podymova N. B., A. A. Karabutov // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **4** 58. (2020)).
- [16] Anu K., Hemalatha J. // *J. Molecul. Liquid.* **256,** P.213. (2018).
- [17] Hezam, F.A., Nur O., Mustafa M. A. // *Coll. and Surf. A: Physicochem. and Engin. Asp.* **592.** 124586. (2020).
- [18] Maaz K., Mumtaz A., Hasanain S.K., Ceylan A. // *J. Magn. Magn. Mater.* **1308.** 289. (2007).
- [19] Bae D.S., Kim S.W., Lee H.W., Han K.S. // *Mater. Lett.* **57.** 1997. (2003).
- [20] Ndlovu B., Msomi J.Z., Moyo Th. // *J. All. and Comp.* **745.** 187. (2018).
- [21] Kumar A., Sharma P., Varshney D. // *Ceram. Intern.* **40.** 12855. (2014).
- [22] Joshi S. and Kumar M. // *Ceram. Intern.* **42.** 18154 (2016).
- [23] Srivastava M., Chaubey S., Ojha A.K. // *Mater. Chem. Phys.* **118.** 174. (2009).
- [24] Ryapolov P.A., Sokolov E.A., Postnikov E.B. // *J. Magn. Magn. Mater.* **549.** 169067. (2022).
- [25] Liu N.N., Pyatakov A.P., Zharkov M.N. et al. // *Appl. Phys. Lett.* **120.** 102403. (2022).
- [26] Stan C., Cristescu C.P., Balasoiu M. // *U.P.B. Sci. Bull., Series A.* **73,** N31. 167. (2011). <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:225065331>
- [27] Sharifi I., Shokrollah H., Amiri S. // *J. Magn. Magn. Mater.* **324.** 903. (2012).
- [28] Fasalurahman P., Blessy B., Basihuddeen A.V. et al. // *Mater. Res. Express.* **3.** 045020. (2016).

- [29] Ahmad T., Rosy E.S., Hendra S. et al. // *Heliyon*. **6**. e05813. (2020).
- [30] Stuti R., Varma G. D. // *Physica B: Phys. of Cond. Mat.* **472**. 66. (2015).
- [31] Hashim M., Kumar A.S., Koo B.H. et al. // *J. All. and Comp.* **51**. 811. (2012).
- [32] Шуленина А.В., Авдеев М.В., Аксенов В.Л. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. №. 2. 38. (2012). (Shulenina A. V., Avdeev M. V., Aksenov V. L., et al. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **2** 38. (2012)).
- [33] Iqbal M.J., Farooq S. // *Mater. Scien. and Engin.: B.* **136**. 140. (2007).
- [34] Iqbal M.J., Siddiquah M.R. // *J. All. and Comp.* **453**. 453513. (2008).
- [35] Gubin S.P. *Magnetic Nanoparticles*. 483. Wein., Ger. (2009).

Synthesis and Magnetic Properties of Magnetic Fluids Based on $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Nanoparticles

S.E. Kirgizov^a, K.O. Kuvandikov, D.H. Imamnazarov

Samarkand State University named after Sharof Rashidov, Institute of Engineering Physics

Samarkand, 140104 Uzbekistan

E-mail: ^aqirgizovsobit94@gmail.com

Magnetic nanoparticles $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ with $x = 0, 0.25, 0.5, 0.75$ were synthesized by using chemical coprecipitation method and magnetic fluids based on them were prepared. A structural and phase analysis of the obtained nanoparticles was performed, the characteristic sizes of nanoparticles and size dispersion, the magnetization of magnetic fluids containing 0.5% volume concentration of magnetic nanoparticles were determined. Diffraction patterns of all compositions confirm the formation of a single-phase structure of cubic spinel NiFe_2O_4 and CoFe_2O_4 . The average particle diameters determined using a transmission electron microscope are 17.22, 15.04, 14.69, 11.18 nm at $x = 0, 0.25, 0.5, 0.75$, respectively. The saturation magnetization of $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles based magnetic fluids decreases from 38.25 emu/kg to 5.33 emu/kg as the cobalt concentration decreases from $x = 0.75$ to $x = 0$. If at $x = 0, 0.25$ and 0.5 magnetic fluids are characterized by superparamagnetic properties, then for $\text{Co}_{0.75}\text{Ni}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ based fluids a wide hysteresis loop with a coercive force $H_C = 612$ Oe was discovered, which is associated with the single-domain state of $\text{Co}_{0.75}\text{Ni}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ particles despite their small size.

PACS: 75.90.+w

Keywords: magnetic fluid, nanoparticle, X-ray diffraction analysis, magnetization.

Received 27 April 2024.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2024. **79**, No. 5. Pp. .

Сведения об авторах

1. Киргизов Собит Эркинбой угли — аспирант, тел: +998 90 101-77-30, e-mail: qirgizovsobit94@gmail.com.
2. Кувандиков Облокул Кувандикович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: +998 93 727-82-50, e-mail: quvandikov@rambler.ru.
3. Имамназаров Даврон Хамраевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: +998 93 994-88-52, e-mail: davron_imamnazarov@rambler.ru.