

**ФІЗИЧНАЯ ХІМІЯ**  
**PHYSICAL CHEMISTRY**

УДК 532.135, 537.622, 546.05  
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-4-271-280>

Поступила в редакцию 06.09.2023  
Received 06.09.2023

**Ю. С. Гайдук<sup>1</sup>, Е. В. Коробко<sup>2</sup>, Р. П. Голодок<sup>1</sup>, А. Е. Усенко<sup>1</sup>, В. В. Паньков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,  
Минск, Беларусь

**ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА  
АЛЮМОФЕРРИТА БАРИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
В СОСТАВЕ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ**

**Аннотация.** Перспективным направлением применения микро- и наноразмерных магнитных частиц является создание магнитореологических материалов, в которых такие частицы являются компонентом комплексной дисперсной фазы. Наибольшую роль играет высокое значение напряжения сдвига в суспензиях на основе магнитных частиц при приложении магнитного поля, а также низкое значение коэрцитивной силы. Целью работы являлось изучение структуры, морфологии, магнитных свойств алюмоферрита бария и оценка его эффективности в магнитном поле (по реологическим свойствам магнитореологической жидкости, изготовленной с его использованием). Цитратным золь-гель методом синтезирован алюмоферрит бария  $BaAl_2Fe_{10}O_{19}$  гексагональной структуры. С использованием методов рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии, ИК-спектроскопии, магнетометрии исследованы его структурные и микроструктурные особенности, магнитные свойства. Порошок обладал максимальной удельной намагниченностью  $M = 20,4 \text{ A} \times \text{m}^2/\text{kg}$  и коэрцитивной силой  $H_c = 4,8 \text{ kOe}$  (при 300 К). Высокое значение напряжения сдвига суспензии (3,5 кПа) при сравнительно невысокой индукции магнитного поля (625 мТл) позволяют считать полученный материал перспективным для использования в качестве дополнительного функционального наполнителя для магнитореологических жидкостей.

**Ключевые слова:** феррит бария, магнитореологические жидкости, магнитные жидкости

**Для цитирования.** Золь-гель синтез, структура и магнитные свойства алюмоферрита бария для использования в составе магнитореологических жидкостей / Ю. С. Гайдук [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2024. – Т. 60, № 4. – С. 271–280. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-4-271-280>

**Yu. S. Haiduk<sup>1</sup>, E. V. Korobko<sup>2</sup>, R. P. Golodok<sup>1</sup>, A. E. Usenka<sup>1</sup>, V. V. Pankov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**SOL-GEL SYNTHESIS, STRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES  
OF BARIUM ALUMINOFERRITE FOR USE IN MAGNETORHEOLOGICAL FLUIDS**

**Abstract.** A promising area of application of micro- and nanosized magnetic particles is the creation of magnetorheological materials in which such particles are a component of a complex dispersed phase. Of greatest importance is the high shear stress in suspensions based on magnetic particles when a magnetic field is applied, as well as low value of the coercive force. The aim of the work was to study the structure, morphology, and magnetic properties of barium aluminoferrite powders, and to evaluate their effectiveness in magnetic fields by the rheological properties of magnetorheological fluids fabricated using them. Barium aluminoferrite  $BaAl_2Fe_{10}O_{19}$  of hexagonal structure was synthesized by the citrate sol-gel method. Using the methods of X-ray phase analysis, scanning electron microscopy, IR spectroscopy, magnetometry, its structural and microstructural features, and magnetic properties were studied. The powder had a maximum specific magnetization  $M = 20.4 \text{ A} \times \text{m}^2/\text{kg}$  and a coercive force  $H_c = 4.8 \text{ kOe}$  (at 300 K). The high shear stress (3.5 kPa) at a relatively low magnetic field induction (625 mT) makes it possible to consider the resulting material as promising for use as an additional functional filler for magnetorheological fluids.

**Keywords:** barium ferrite, magnetorheological fluids, magnetic fluids

**For citation.** Haiduk Yu. S., Korobko E. V., Golodok R. P., Usenka A. E., Pankov V. V. Sol-gel synthesis, structure and magnetic properties of barium aluminoferrite for use in magnetorheological fluids. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical series*, 2024, vol. 60, no. 4, pp. 271–280 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-4-271-280>

**Введение.** Магнитореологические жидкости (МРЖ) относятся к числу так называемых интеллектуальных материалов, реологические и механические свойства (вязкость, напряжение сдвига, предел текучести и т. д.) которых можно контролируемо изменять во внешнем магнитном поле. Реологические свойства таких жидкостей заключаются в изменении их вязкопластичных свойств за счет взаимодействия наполняющих их магнитных частиц с магнитным полем, что связано в первую очередь с изменением структуры жидкости, а именно с ориентацией структурных образований по направлению поля. Известно, что МРЖ могут использоваться в качестве рабочих тел в магнитоуправляемых механических передаточных устройствах (например, в амортизаторах [1], регулирующих клапанах, различных устройствах виброзащиты и сейсмозащиты, прецизионной полировке [2], космической и военной технике [3], биомеханике и биомедицине [4, 5] и т. д.). В общем случае МРЖ представляют собой суспензии, состоящие из высокодисперсных и ультрадисперсных сильно намагничивающихся частиц, взвешенных в ненамагничивающейся жидкости и стабилизированных поверхностно-активными веществами. Из-за большой намагниченности насыщения обычно используются высокодисперсные частицы карбонильного железа, полученные термическим разложением пентакарбонила железа. Кроме того, в качестве материала частиц магнетиков могут использоваться некоторые металлы и их сплавы или оксиды (например, магнетит или ферриты) [6, 7]. В качестве жидкости-носителя могут применяться минеральные и силиконовые масла, полиэферы, синтетические углеводороды, а в отдельных случаях даже вода. Для стабилизации МРЖ в качестве наполнителей используются частицы размеров от долей нанометров до десятков микрометров, что заметно замедляет их оседание, а также применяются поверхностно-активные вещества, препятствующие слипанию и седиментации частиц в жидкости. Традиционно применяемые в качестве функционального наполнителя МРЖ частицы карбонильного железа обладают сферической формой. Включение несферических частиц ферритов в составы МРЖ дает некоторое преимущество, связанное с появлением синергетического эффекта увеличения вязкости [6]. Вместе с тем нет четкого представления о влиянии природы и формы частиц наполнителя и таких параметров, как размер частиц, коэрцитивная сила, намагниченность насыщения, на магниточувствительность МРЖ.

МРЖ, представляющая собой суспензию, должна обладать определенной степенью дисперсности частиц твердой фазы, хорошей смачиваемостью дисперсионной среды, достаточно равномерным распределением частиц дисперсной фазы в дисперсионной среде, хорошей агрегативной и седиментационной устойчивостью, заданными реологическими свойствами (текучестью), способностью к структурированию во внешнем магнитном поле. К функциональным наполнителям-ферритам обычно предъявляются требования высокой намагниченности, низкой коэрцитивной силы и выраженного фактора формы (анизометричности) частиц.

В качестве перспективных ферритмагнитных материалов активно исследуются феррит кобальта и ферриты кобальта-цинка, которые получают обычно методами соосаждения, золь-гель методом, методом электростатического распыления и другими способами [8–10]. Феррит цинка имеет решетку кубической шпинели с нормальным типом распределения катионов по подрешеткам, а феррит кобальта обладает обратимым распределением катионов. Структурные отклонения вызывают неравновесное распределение катионов в решетке, что является причиной изменения магнитных свойств [11–14]. Изменяя распределение катионов в решетке феррита за счет образования твердых растворов можно в известных пределах менять магнитные свойства материала. Например, введение немагнитного иона  $Zn^{2+}$  в решетку феррита кобальта, занимающего преимущественно тетраэдрические позиции, приведет к миграции ионов  $Fe^{3+}$  в октаэдрические позиции, что вызовет увеличение магнитного момента [13].

В предыдущих работах [14, 16] нами изучались возможности применения для создания магнитореологических материалов ферритов со структурой шпинели – феррита кобальта и феррита кобальта-цинка. Феррит кобальта-цинка ранее исследовался с целью оценки возможности его использования в качестве поглощающих и экранирующих материалов [17, 18]. Порошок  $Co_{0,65}Zn_{0,35}Fe_2O_4$ , полученный методом распылительной сушки с последующим отжигом в матрице инертного компонента NaCl, имел удельную намагниченность около  $\sim 45 \text{ A} \times \text{м} \times \text{кг}^{-1}$  и в суспензии индустриального масла показывал напряжение сдвига  $\sim 1,0 \text{ кПа}$  при индукции

магнітнага поля 625 мТл [16]. Порошок  $\text{Co}_{0,65}\text{Zn}_{0,35}\text{Fe}_2\text{O}_4$ , атрычаны метадом сааааднення с паследуючым абжыгам пры 740 °С, паказывал в тэх же условиях напряжение сдвига ~ 3,5 кПа. Распылительной сушке подвергался осадок, полученный добавлением водного раствора аммиака к раствору исходных нитрата железа, нитрата кобальта и хлорида цинка. Эти же соли были использованы для получения кобальт-цинкового феррита методом соосаждения.

Гексаферритами называют ферриты, изоструктурные магнетоплюмбиту. Считается, что получение однофазных гексаферритов сложнее, чем получение шпинелей, однако в настоящее время их успешно получают самыми разнообразными методами, включая керамический, золь-гель, микроэмульсионный, метод соосаждения, гидротермальный, самораспространяющийся высоко-температурный и др. [19].

Гексагональные ферриты разделяют на несколько типов: М, Z, W, X, Y, U. Ферриты М-типа получили наибольшее распространение. Они отличаются химической стабильностью, наличием магнитной анизотропии, высокими значениями температуры Кюри, большим сопротивлением и широким диапазоном частот магнитного резонанса [19–21]. Изученный нами гексаферрит бария имел структуру М-типа. Данный феррит исследовался в качестве компонента новых поглощающих и экранирующих материалов благодаря его свойствам поглощения микроволнового излучения [19]. Легирование алюминием гексаферрита бария производилось преимущественно с целью регулирования (увеличения) его электрического сопротивления для расширения диапазона частот переменного тока полей, в которых эксплуатируются магнитные материалы [20]. Целью настоящей работы является получение полидисперсного алюмоферрита бария, изучение его структуры, морфологии, магнитных и магнитореологических свойств для применения в качестве наполнителя высокоэффективной МРЖ.

**Методика эксперимента.** Алюмоферрит бария  $\text{BaAl}_2\text{Fe}_{10}\text{O}_{19}$  получен цитратным золь-гель методом. Навески нитратов бария  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  («ч.», 11,92 г), алюминия  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \times 9\text{H}_2\text{O}$  («ч.», 34,24 г), железа  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \times 9\text{H}_2\text{O}$  («ч.», 186,0 г) последовательно растворяли в 200 мл дистиллированной воды, затем добавляли 251,03 г моногидрата лимонной кислоты  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \times \text{H}_2\text{O}$  («х. ч.») и перемешивали до полного растворения. Смесь выпаривали и прокаливали в фарфоровой чашке на электрической плите до прекращения выделения газообразных продуктов разложения нитратов и лимонной кислоты (наблюдался переход черной окраски в коричневую), затем измельчали спек в ступке и обжигали на воздухе при 960 °С на протяжении 3 ч.

Рентгенографические исследования проводили с использованием дифрактометра ДРОНЗ ( $\text{Co}_{K\alpha}$ -излучение,  $\lambda = 0,1790$  нм) в интервале углов  $2\theta = 6\text{--}90^\circ$ . Размеры областей когерентного рассеяния (ОКР)  $D$  определяли по уширению дифракционных отражений (метод Шеррера, формула 1).

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta'}, \quad (1)$$

где  $k$  – константа, соответствующая типу решетки, для гексаферрита равная 0,89,  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения  $\lambda = 0,1790$  нм,  $\beta$  – полуширина дифракционного пика на полувысоте, град,  $2\theta$  – положение пика. Для вычисления  $\beta$  на цифровых дифрактограммах использовалась программа «Расчет экспериментальных дифрактограмм 5.2».

Степень кристалличности оценивали следующим образом:

$$\left(1 - \frac{I_{\text{фон}}}{I_{114}}\right) \times 100 \%, \quad (2)$$

где  $I_{107}$  – интенсивность 100 % рефлекса (в нашем случае рефлекс с индексом  $\langle 114 \rangle$ ), а  $I_{\text{фон}}$  – уровень фонового сигнала [22].

ИК-спектры записывали на спектрометре AVATAR FTIR-330 (ThermoNicolet) в области волновых чисел ( $\nu$ ) 400–700  $\text{cm}^{-1}$  с разрешением  $\pm 1 \text{ cm}^{-1}$ . Запись производили методом диффузионного рассеяния при помощи приставки Smart Diffuse Reflectance.

Метод сканирующей электронной микроскопии применяли для изучения структуры поверхности поликристаллических и пленочных образцов на приборе LEO 1420. Для оценки распределения частиц по размерам использовался относительный метод обсчета при помощи построения

гистограмм, показывающих процентное содержание частиц каждого класса. Процентное содержание частиц (ордината гистограммы) рассчитывалось по формуле  $n = 100A/N$ , где  $A$  – число частиц данного класса на выбранном участке, а  $N$  – их суммарное число.

Исследование магнитных характеристик проводилось на установке Cryogen Free Measurement System Cryogenic Ltd, где были записаны петли гистерезиса при температурах 10 и 300 К и индукции магнитного поля  $B_{\max} = 8$  Тл.

Магнитореологическую чувствительность наполнителей определяли на вискозиметре НААКЕ RV 12, оснащённом индуктором магнитного поля, с измерительной ячейкой типа пластина–пластина. Нижняя пластина вискозиметра изготовлена из немагнитной стали, верхняя – из магнитной. Тестирование образцов МРЖ проводили в постоянном магнитном поле индукцией от 62,5 до 625 мТл. Магнитореологические свойства жидкости определяли в фиксированном магнитном поле при изменении скорости сдвига от 0,01 до 536 с<sup>-1</sup>. Магниточувствительность оценивалась по изменению напряжения сдвига МРЖ при воздействии постоянного магнитного поля различной индукции.

Для проведения тестирования образец МРЖ готовили путем механического диспергирования, используя в качестве магниточувствительной дисперсной фазы частицы алюмоферрита бария в количестве 20 мас.%, жидкости-носителя – синтетическое масло Mobil 22, антиседиментационной добавки – моноолеат глицерина в количестве 2 мас.%. Для увеличения распределения моноолеата глицерина по поверхности частиц алюмоферрита бария его предварительно растворяли в синтетическом масле. Предварительно просеянный алюмоферрит бария вводили небольшими порциями при тщательном перетирании каждой из них.

Термический анализ производился на синхронном анализаторе Netzsch STA-449c Jupiter в температурной области 20–1 200 °С при скорости нагрева 5°/мин на воздухе. Масса образца составляла 50–100 мг. Применялся синхронный ТГ-ДТА/ДСК анализ, при котором одновременно измеряется изменение теплового потока и массы образца как функция от температуры или времени.

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 1 представлены спектры рентгенофазового анализа (РФА) порошка алюмоферрита бария после обжига на воздухе при 960 °С. На спектре фиксируется формирование в качестве преобладающей фазы алюмоферрита бария. Дифракционные рефлексы отличаются высокой интенсивностью и малым уширением, что свидетельствует о формировании высокоупорядоченной кристаллической решетки.

По данным анализа РФА-спектра средний размер областей когерентного рассеяния, рассчитанный по избранным рефлексам, составил ~ 12 нм, а степень кристалличности материала составила 65 % (табл. 1). Размер областей когерентного рассеяния принято отождествлять с физическим размером кристаллитов.

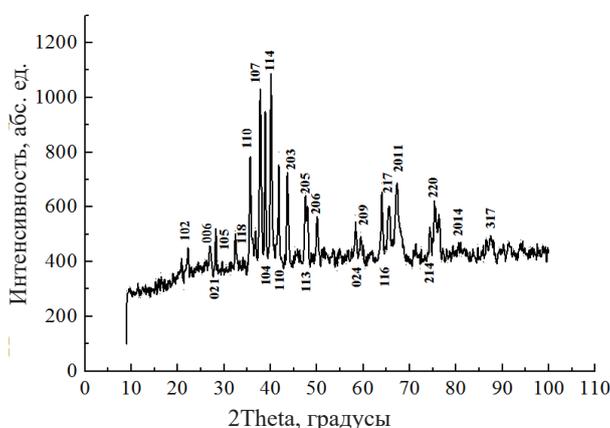


Рис. 1. Дифрактограмма порошка алюмоферрита бария, обжиг 960 °С, 3 ч (на воздухе).  
Сверху от базовой линии подписаны рефлексы гексаферрита бария, снизу – оксида железа

Fig. 1. Diffractogram of barium aluminoferrite powder after annealing at 960 °C, 3 h (in air).  
Reflections of barium hexaferrite are indicated above the base line, and reflections of iron oxide are indicated below

Таблица 1. Размеры областей когерентного рассеяния  $BaAl_2Fe_{10}O_{19}$   
 Table 1. Coherent scattering region sizes of  $BaAl_2Fe_{10}O_{19}$

Положение рефлекса (2θ), градусы	Относительная интенсивность пика, %	Полуширина рефлекса на полувысоте, град	Кристаллографический индекс (hkl)	Размер ОКР, D, нм	Средний размер ОКР, D <sub>ср</sub>
35,622	60,1	0,7	(110)	14	12
36,660	15,5	1,9	(112)	5	
37,788	100	0,7	(107)	14	
40,100	98,6	0,6	(107)	16	
41,743	39,2	0,7	(200)	14	
43,633	52,1	0,7	(203)	14	
47,659	42,9	1,0	(205)	10	

Данные ИК-спектроскопии (рис. 2) подтверждают формирование фазы алюмоферрита бария со структурой магнетоплюмбита.

ИК-спектр поглощения порошка  $BaAl_2Fe_{10}O_{19}$  (см. рис. 2) согласуется с литературными данными. На спектре хорошо выражены характеристические полосы поглощения феррита бария в интервале волновых чисел 430–590  $cm^{-1}$  [23–26]. Два основных пика поглощения соответствуют волновым числам 424,3 и 541,9  $cm^{-1}$ . Полосу поглощения при 424,3  $cm^{-1}$ , вероятно, можно отнести к колебаниям Ba–O и Fe–O в октаэдрических позициях, а полосу при 541,9 – к колебаниям Ba–O и Fe–O в тетраэдрических позициях. В гексагональных ферритах полосы поглощения, соответствующие кислородным связям металла, могут наблюдаться в диапазоне 400–800  $cm^{-1}$  [25]. Изменение температуры обжига приводит к некоторому смещению положения характеристических полос, что может быть связано с ростом размера зерен. Смещение полос также может быть связано с легированием кристаллической решетки различными заместителями. В целом расположение характеристических линий с небольшими смещениями соответствует спектру гексаферрита бария, представленному на рис. 3 [25]. На спектре имеются полосы поглощения, обусловленные колебаниями физически и химически адсорбированной воды (колебания связей ОН около 1 636,5 и 3 200–3 400  $cm^{-1}$ ).

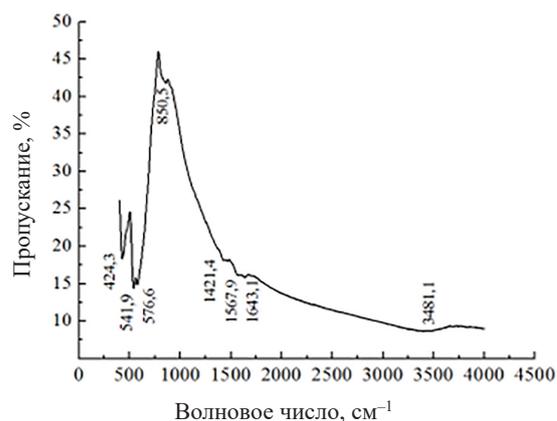


Рис. 2. ИК-спектр поглощения порошка  $BaAl_2Fe_{10}O_{19}$  (обжиг 960 °С, 3 ч)

Fig. 2. IR absorption spectrum of  $BaAl_2Fe_{10}O_{19}$  powder (annealing at 960 °C, 3 h)

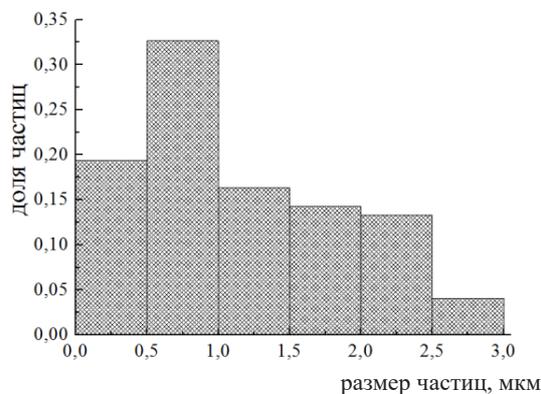
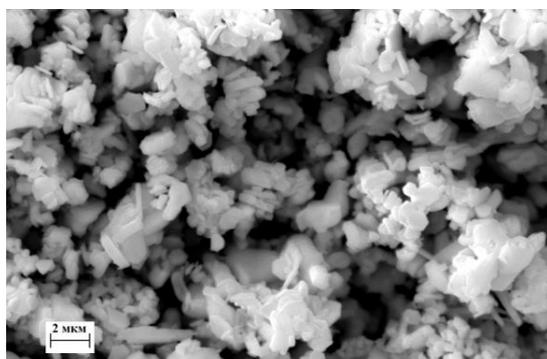


Рис. 3. СЭМ-исследование порошка  $BaAl_2Fe_{10}O_{19}$  (обжиг 960 °С, 3 ч): микрофотография (a); гистограмма распределения частиц по размерам (b)

Fig. 3. SEM study of  $BaAl_2Fe_{10}O_{19}$  powder (annealing at 960 °C, 3 h): micrograph (a); histogram of particle size distribution (b)

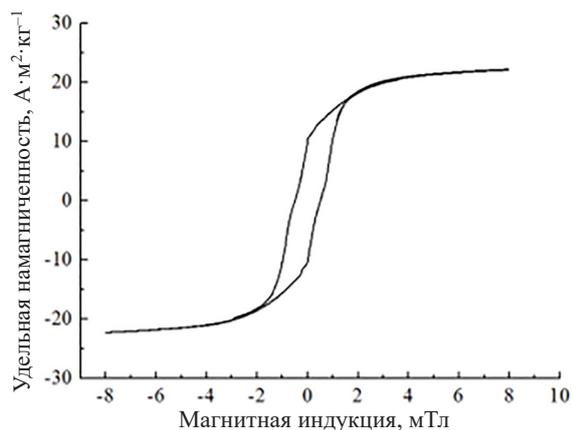


Рис. 4. Кривая удельной намагниченности насыщения порошка  $\text{BaAl}_2\text{Fe}_{10}\text{O}_{19}$  при 300 К (обжиг 960 °С, 3 ч)

Fig. 4. Specific saturation magnetization curve of  $\text{BaAl}_2\text{Fe}_{10}\text{O}_{19}$  powder at 300 K (annealing at 960 °C, 3 h)

$M = 97,9 \text{ A} \times \text{m}^2/\text{kg}$  [15]. Форма кривой намагниченности близка к форме, известной из литературных данных для гексаферрита бария [28]. Перегибы на кривых (вблизи значений по оси ординат 10 и  $-10$ ), могут быть обусловлены взаимодействием между жестким и мягким режимами анизотропии, полидисперсностью порошка, формой частиц и их взаимодействием между собой.

Величина коэрцитивной силы порошка  $\text{BaAl}_2\text{Fe}_{10}\text{O}_{19}$  при 300 К составила  $H_c \sim 4,8 \text{ кЭ}$ , в то время как для  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  и  $\text{Co}_{0,65}\text{Zn}_{0,35}\text{Fe}_2\text{O}_4$  [15] – 0,27 и 0,1 кЭ. Несмотря на то что полученное значение коэрцитивной силы выше, чем у ранее исследованных порошков, оно является приемлемым для использования порошка в составе МРЖ. Величина коэрцитивной силы прежде всего связана с характеристической константой анизотропии материала. Наличие в образцах неоднородностей, примесей, дефектов кристаллической решетки, препятствующих перемагничиванию образца, могут вести к росту  $H_c$ . Эти факторы связаны с методикой синтеза образца, и в известных пределах ее значение может изменяться при вариациях в методике синтеза. В случае МРЖ желательно использовать ферриты с меньшей коэрцитивной силой, чтобы повысить магнитоуправляемость композиции.

Выбор температуры обжига, производимого на завершающей стадии синтеза порошка, влияет на размер частиц и содержание примесных фаз. Для получения оптимальных магнитных свойств размер зерна должен находиться в пределах диапазона критического размера для однодоменной структуры, который в случае  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  оценивается в 460 нм [25]. Синтез материала проводился при температуре 960 и 1 020 °С. Увеличение температуры обжига приводит к снижению доли примеси оксида железа, однако нами выбран порошок с меньшей температурой обжига и более высоким содержанием оксида железа. Наличие данной примеси хоть и приводит к снижению значения удельной намагниченности, выполняет положительную роль: препятствует агрегированию частиц феррита бария и позволяет более равномерно диспергировать частицы в магнитореологической суспензии.

В табл. 2 представлены магнитные параметры порошка  $\text{BaAl}_2\text{Fe}_{10}\text{O}_{19}$ , а также исследованных ранее порошков  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  и  $\text{Co}_{0,65}\text{Zn}_{0,35}\text{Fe}_2\text{O}_4$  [14], рассчитанных из формы петель магнитного гистерезиса. Считается, что более высокие значения удельной намагниченности повышают магнитоуправляемость жидкотекучих композиций. Отношение  $M_r / M_s$  также называется отношением прямоугловности и показывает, насколько квадратной является петля гистерезиса. Для определенных приложений, таких как запоминающие устройства, это отношение должно быть как можно больше, но для магнитных жидкостей желательно меньше. Несмотря на заметно меньшее значение  $M_s$  и более высокое значение  $M_r / M_s$  аллюмоферрита бария по сравнению с аналогами, его реологические характеристики оказались выше. Полученное напряжение сдвига (увеличение вязкости) заметно выше по сравнению с ферритом кобальта и ферритом кобальта-цинка, ранее

В соответствии с рис. 3, на котором представлены СЭМ-микрофотография и диаграмма распределения частиц по размеру, диаметр частиц преимущественно пластинчатой формы составляет 0,2–2,5 мкм. Наиболее многочисленной фракцией являются частицы с диаметром 0,5–1,0 мкм. Преимущественная форма и распределение частиц по размеру оказываются близкими к таковым для незамещенного гексаферрита бария [27].

На рис. 4 представлена кривая намагниченности порошка  $\text{BaAl}_2\text{Fe}_{10}\text{O}_{19}$  при 300 К. Полученное значение максимальной удельной намагниченности  $M = 20,4 \text{ A} \times \text{m}^2/\text{kg}$  существенно меньше, чем у исследованных ранее порошков со структурой шпинели. Например, для феррита кобальта  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  величина максимальной удельной намагниченности при 300 К составляла  $M = 73,2 \text{ A} \times \text{m}^2/\text{kg}$ , а для кобальт-цинкового феррита  $\text{Co}_{0,65}\text{Zn}_{0,35}\text{Fe}_2\text{O}_4$  –

рекомендованными для практического применения [14]. Например, при скорости сдвига  $\gamma = 8 \text{ c}^{-1}$  для  $\text{BaAl}_2\text{Fe}_{10}\text{O}_{19}$  напряжение сдвига  $\tau$  составило 2 750 Па в магнитном поле 625 мТл, а для исследованных ранее  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  и  $\text{Co}_{0,65}\text{Zn}_{0,35}\text{Fe}_2\text{O}_4 - 2\ 400$  Па. Таким образом, можно предположить, что фактор формы (анизотропность) частиц наполнителя является для получения суспензий с высоким напряжением сдвига более важной характеристикой, чем его остаточная намагниченность и намагниченность насыщения.

Таблица 2. Параметры кривых намагничивания порошков (намагниченность насыщения  $M_s$ , приведенная остаточная намагниченность  $M_r/M_s$ , коэрцитивная сила  $H_c$ ) при  $T = 300 \text{ K}$

Table 2. Parameters of the magnetization curves (saturation magnetization  $M_s$ , reduced remanence magnetization  $M_r/M_s$ , coercive force  $H_c$ ) at  $T = 300 \text{ K}$

Материал	$M_s$	$M_r/M_s$	$H_c$
$\text{BaFe}_{10}\text{Al}_2\text{O}_{19}$	20,4	0,60	4,8
$\text{CoFe}_2\text{O}_4$	73,2	0,37	0,27
$\text{Co}_{0,65}\text{Zn}_{0,35}\text{Fe}_2\text{O}_4$	97,9	0,12	0,1

Сравнение размеров кристаллитов (областей когерентного рассеяния), рассчитанных по методу рентгеновской порошковой дифракции (см. табл. 1), с размерами частиц показывает, что отдельные частицы после проведенного обжига шихты при  $960 \text{ }^\circ\text{C}$  содержат несколько кристаллитов.

Полученный порошок на основе алюмоферрита бария обладал большой маслоемкостью и формировал устойчивые суспензии в индустриальном масле Mobil 22. Это делает возможным применение данного материала в качестве функционального наполнителя различных магнито-реологических материалов, включая магнито-реологические суспензии на основе карбонильного железа в синтетическом масле (в настоящее время наиболее эффективным магнитным наполнителем для МРЖ является карбонильное железо). В последнем случае добавка выполняла бы модифицирующую и стабилизирующую функции. На рис. 5 представлена зависимость напряжения сдвига в магнитном поле магнито-реологических суспензий, содержащих 20 мас.% магнитных частиц.

На рис. 6 приведены ТГ- и ДСК-спектры порошка исследуемого материала. Потери массы при нагреве образца на воздухе в интервале  $20\text{--}200 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 6, a) не превышают 1 %. Как следует из рис. 6, b, образец не претерпевает ни фазовых переходов, ни других превращений с поглоще-

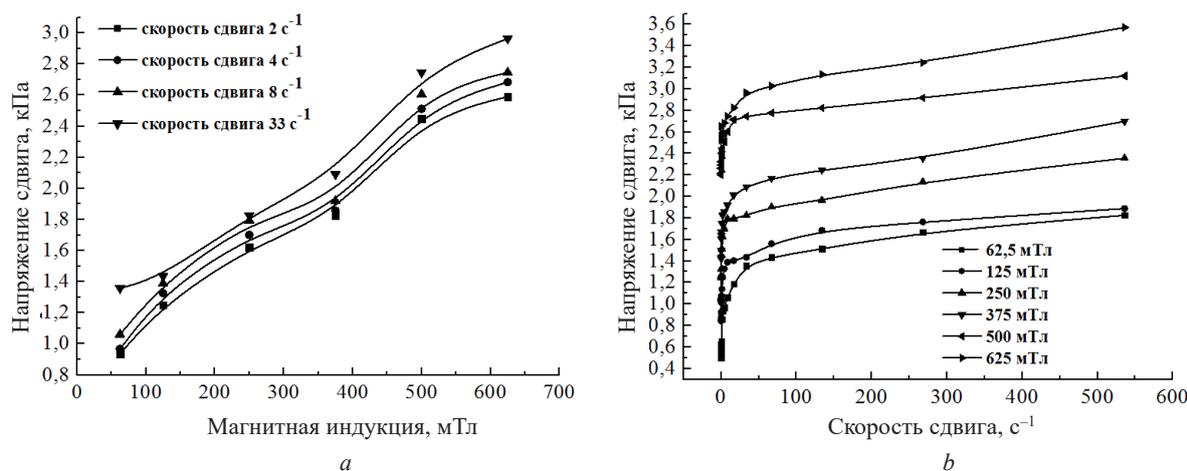
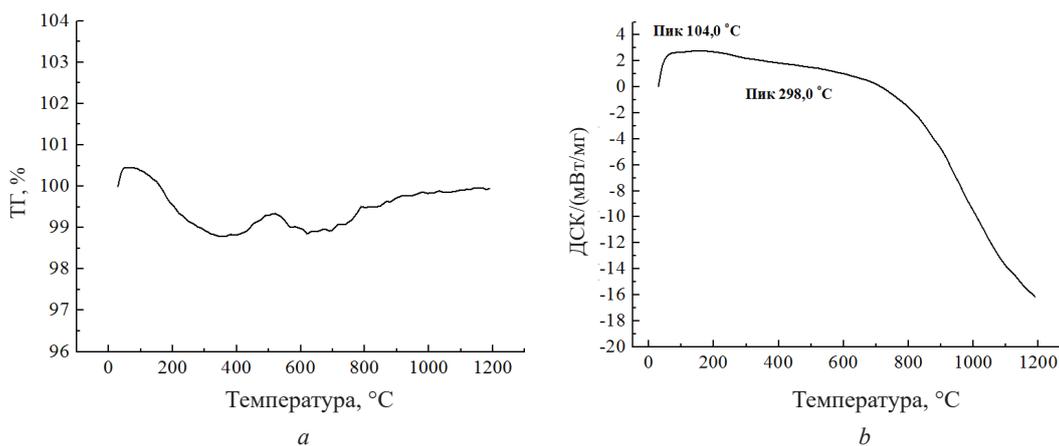


Рис. 5. Зависимости напряжения сдвига МРЖ, содержащей 20 мас.%  $\text{BaAl}_2\text{Fe}_{10}\text{O}_{19}$  в Mobil 22,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ : от индукции магнитного поля при различных скоростях сдвига, при воздействии магнитного поля различной индукции (a); при воздействии магнитного поля различной индукции (b)

Fig. 5. Dependences of the shear stress of MRF containing 20 wt. %  $\text{BaAl}_2\text{Fe}_{10}\text{O}_{19}$  in Mobil 22,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ : on the magnetic field induction at different shear rates, when exposed to a magnetic field of different induction (a); when exposed to a magnetic field of different induction (b)

Рис. 6. Кривые ТГ- (а) и ДСК- (b) порошка феррита BaAl<sub>2</sub>Fe<sub>10</sub>O<sub>19</sub>Fig. 6. TG- (a) and DSC- (b) curves of BaAl<sub>2</sub>Fe<sub>10</sub>O<sub>19</sub> ferrite powder

нием или выделением тепла (отсутствие выраженных экзотермических и эндотермических пиков на кривой ДСК), что позволяет предположить стабильную работу добавки порошка феррита в составе комплексной дисперсной фазы при повышенных температурах (МРЖ могут эксплуатироваться при температурах 20–400 °С).

**Выводы.** Высокое значение напряжения сдвига (3,5 кПа и выше) при сравнительно невысокой индукции магнитного поля (~ 625 мТл) позволяет рассматривать синтезированные цитратным золь-гель методом порошки BaAl<sub>2</sub>Fe<sub>10</sub>O<sub>19</sub> в качестве перспективного функционального наполнителя для создания магнитореологических материалов, эффективно управляемых магнитным полем. В отличие от метода соосаждения из растворов, использованного ранее при синтезе ферритов со структурой шпинели [14, 16], следует также отметить простоту золь-гель синтеза алюмоферрита бария, позволяющую упростить масштабирование синтеза и стоимость материала. Наличие примеси α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> понижает удельную намагниченность порошка, однако тем самым препятствует агрегированию частиц в МРЖ. Вместе с тем пластинчатые частицы обеспечивают высокий магнитореологический отклик суспензии, демонстрируя приоритетное значение фактора формы (анизотричности) частиц над величиной намагниченности для достижения высокого напряжения сдвига магнитных суспензий.

### Список использованной литературы

1. Khan, S. A. Principles, Characteristics and Applications of Magneto Rheological Fluid Damper in Flow and Shear Mode / S. A. Khan, A. Suresh, N. SeethaRamaiah // *Procedia Materials Sci.* – 2014. – Vol. 6. – P. 1547–1556. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.136>
2. Kordonski, W. I. Magnetorheological Jet (MR Jet<sup>sup</sup> TM]) Finishing Technology / W. I. Kordonski, A. B. Shorey, M. Tricard // *J. Fluids Eng.* – 2006. – Vol. 128, iss. 1. – P. 20. <https://doi.org/10.1115/1.2140802>
3. Магнитореологические жидкости: технологии создания и применение: монография / Е. С. Беляев [и др.]; под ред. А. С. Плехова. – Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. П. Е. Алексеева, 2017. – 94 с.
4. Magnetic fluid hyperthermia (MFH): cancer treatment with AC magnetic fluid induced excitation of biocompatible superparamagnetic nanoparticles / A. Jordan [et al.] // *J. Magn. Magn. Mater.* – 1999. – Vol. 201, iss. 1–3. – P. 413–419. [https://doi.org/10.1016/s0304-8853\(99\)00088-8](https://doi.org/10.1016/s0304-8853(99)00088-8)
5. Marie, H. Magnetic-fluid-loaded liposomes for MR imaging and therapy of cancer / H. Marie, V. Plassat, S. Lesier // *J. Drug Deliv. Sci. Technol.* – 2013. – Vol. 23, № 1. – P. 25–37. [https://doi.org/10.1016/S1773-2247\(13\)50004-9](https://doi.org/10.1016/S1773-2247(13)50004-9)
6. Нанодисперсные наполнители на основе оксида железа для комплексной дисперсной фазы магнитоуправляемых гидравлических жидкостей / Е. В. Коробко [и др.] // *Наноструктуры в конденсированных средах: сб. науч. ст.* – Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2018. – С. 182–188.
7. The size induced effect on rheological properties of Co-ferrite based ferrofluid / M. Chand [et al.] // *J. Non-Cryst. Solids.* – 2013. – Vol. 361. – P. 38–42. <https://doi.org/10.1016/J.NONCRY SOL.2012.10.003>
8. Synthesis and characterization of cobalt-zinc ferrite nanoparticles coated with DMSA / S. Manouchehri, Z. Ghasemian, D. Shahbazi-Gahrouei, M. Abdolahi // *Chem Xpress.* – 2013. – Vol. 2, iss. 3. – P. 147–152.
9. Study of magnetic and structural properties of ferrofluids based on Cobalt-Zinc ferrite nanoparticles / J. López [et al.] // *Bull. Am. Phys. Soc.* – 2012. – Vol. 324, iss. 4. – P. 394–402. <https://doi.org/10.1016/J.JMMM.2011.07.040>
10. Effect of Zn Substitution on the Magnetic Properties of Cobalt Ferrite Nano Particles Prepared Via Sol-Gel Route / S. Singhal [et al.] // *JEMAA.* – 2010. – Vol. 2, iss. 6. – P. 376–381. <http://doi.org/10.4236/jemaa.2010.26049>
11. Cobalt Ferrite Nanocrystallites for Sustainable Hydrogen Production Application / S. G. Rajendra [et al.] // *Int. J. Electrochem.* – 2011. – Iss. 1. – Article ID 729141. <https://doi.org/10.4061/2011/729141>

12. Chandrashekhara, A. Cobalt Ferrite Nanocrystallites for Sustainable Hydrogen Production Application / A. Chandrashekhara, V. Ladole // *Int. J. Chem. Sci.* – 2012. – Vol. 10, iss. 3. – P. 1230–1234. <https://doi.org/10.4061/2011/729141>
13. Effect of Zn addition on structural, magnetic properties, antistructural modeling of  $\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  nano ferrite / S. Raghuvanshi [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 1953, iss. 1. – Article ID 030055. <https://doi.org/10.1063/1.5032390>
14. Получение и характеристика ферритов кобальта и кобальта-цинка для магнито-реологических материалов / Ю. С. Гайдук [и др.] // *Конденсированные среды и межфазные границы*. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 19–28. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/0000>
15. Sawadzky, G. A. Cation Distributions in Octahedral and Tetrahedral Sites of the Ferrimagnetic Spinel  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  / G. A. Sawadzky, F. Van der Woude, A. H. Morrish // *J. Appl. Phys.* – 1968. – Vol. 39, iss. 2. – P. 1204–1206. <https://doi.org/10.1063/1.1656224>
16. Синтез, структура и магнитные свойства кобальт-цинкового наноферрита для магнито-реологических жидкостей / Ю. С. Гайдук [и др.] // *Конденсированные среды и межфазные границы*. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 28–38. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2526>
17. Fabrication and absorbing property of microwave absorber based on  $\text{BaAl}_2\text{Fe}_{10}\text{O}_{19}$  and poly(o toluidine) / Ch. Keyu [et al.] // *Synth. Met.* – 2011. – Vol. 161, iss. 21–22. – P. 2192–2198. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2011.07.019>
18. Изучение влияния замещения алюминием на электрические свойства гексаферрита бария [Электронный ресурс] / А. Ю. Стариков [и др.] // *Вестн. СМУС74*. – 2018. – Т. 1, № 3. – С. 67–69. – Режим доступа: <https://smus74.ru/content/vypusk-3-22-2018>
19. Золь-гель синтез нанодисперсных твердых растворов на основе гексаферрита бария состава  $\text{Sr}_x\text{Ba}_{(1-x)}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$  / А. И. Ковалёв [и др.] // *Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер.: Химия*. – 2023. – Т. 15, № 1. – С. 131–137.
20. Pullar, R. C. Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics / R. C. Pullar // *Prog. Mater. Sci.* – 2012. – Vol. 57, iss. 7. – P. 1191–1334. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.04.001>
21. Nikmanesh, H. Study of the structural, magnetic, and microwave absorption properties of the simultaneous substitution of several cations in the barium hexaferrite structure / H. Nikmanesh, S. Haghghifard, B. Hadi-Sichami // *J. Alloys Compd.* – 2019. – Vol. 775. – P. 1101–1108. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.051>
22. Синтез наноразмерных кобальт-цинковых ферритов методом низкотемпературного распыления с последующим термолизом / Е. Г. Петрова [и др.] // *Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук*. – 2018. – Т. 54, № 4. – С. 406–412. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-4-406-412>
23. Electrical and Dielectric Properties of  $\text{Y}^{3+}$ -Substituted Barium Hexaferrites / I. A. Auwal [et al.] // *J. Supercond. Nov. Madn.* – 2017. – Vol. 30, iss. 7. – P. 1813–1826. <https://doi.org/10.1007/s10948-017-3978-8>
24. Synthesis and characterization of poly(1-vinyl-1,2,4-triazole) (PVTri)–barium hexaferrite nanocomposite / Z. Durmus [et al.] // *Physica B*. – 2011. – Vol. 406, iss. 11. – P. 2298–2302. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2011.03.063>
25. Phase evolution and temperature dependent magnetic properties of nanocrystalline barium hexaferrite / M. G. Shalini [et al.] // *J. Mater. Sci. – Mater. Electron.* – 2019. – Vol. 30. – P. 13647–13654. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01734-x>
26. Microwave Absorption Properties of  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  Prepared in Different Temperature with Polyaniline Nanocomposites / W. J. Feng [et al.] // *Adv. Mater. Res.* – 2017. – Vol. 1142. – P. 211–215. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1142.211>
27. Структура и магнитные свойства гексагонального феррита бария / К. В. Чернякова [и др.] // *Вестн. БГУ. Сер. 2, Химия. Биология. География*. – 2008. – № 1. – С. 9–13.
28. Zahari, M. H. Structural and magnetic properties of hexagonal barium ferrite synthesized through the sol-gel combustion route / M. H. Zahari, B. H. Guan, L. K. Chuan // *AIP Conference Proceedings*. – 2016. – Vol. 1787, iss. 1. – P. 1–6. <https://doi.org/10.1063/1.4968136>

## References

1. Khan, S.A., Suresh, A., Seetha Ramaiah, N. Principles, Characteristics and Applications of Magneto Rheological Fluid Damper in Flow and Shear Mode. *Procedia Materials Science*, 2014, vol. 6, pp. 1547–1556. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.136>
2. Kordonski W. I., Shorey A. B., Tricard M. Magnetorheological Jet (MR Jet[sup TM]) Finishing Technology. *Journal of Fluids Engineering*, 2006, vol. 128, iss. 1, pp. 20. <https://doi.org/10.1115/1.2140802>
3. Belyaev E. S., Ermolaev A. I., Titov E. Yu., Tumakov S. F. *Magnetorheological fluids: technologies of creation and application*. Ed. by A. S. Plekhov, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev, 2017. 94 p. (in Russian).
4. Jordan A., Scholz R., Wust P., Fak H. Magnetic fluid hyperthermia (MFH): cancer treatment with AC magnetic fluid induced excitation of biocompatible superparamagnetic nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1999, vol. 201, iss. 1–3, pp. 413–419. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00088-8](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00088-8)
5. Marie H., Plassat V., Lesier S. Magnetic-fluid-loaded liposomes for MR imaging and therapy of cancer. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 2013, vol. 23, no. 1, pp. 25–37. [https://doi.org/10.1016/S1773-2247\(13\)50004-9](https://doi.org/10.1016/S1773-2247(13)50004-9)
6. Korobko E. V., Pankov V. V., Kotikov D. A., Novikova Z. A., Novik E. S. Nanodispersed fillers based on iron oxide for the complex dispersed phase of magnetically controlled hydraulic fluids. *Nanostruktury v kondensirovannykh sredakh: sb. nauch. st.* [Nanostructures in condensed media. Collection of scientific articles]. Minsk, A. V. Luikov Institute of Heat and Mass Transfer of the NAS of Belarus, 2018, pp. 182–188 (in Russian).
7. Chand M., Kumar S., Shankar A., Porwal R. The size induced effect on rheological properties of Co-ferrite based ferrofluid. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2013, vol. 361, pp. 38–42. <https://doi.org/10.1016/J.JNONCRY SOL.2012.10.003>
8. Manouchehri S., Ghasemian Z., Shahbazi-Gahrouei D., Abdolah M. Synthesis and characterization of cobalt-zinc ferrite nanoparticles coated with DMSA. *Chem Xpress*, 2013, vol. 2, iss. 3, pp. 147–152.
9. Lopez J., Gonzalez-Bahamon L. F., Prado J., Caicedo J. C. Study of magnetic and structural properties of ferrofluids based on Cobalt-Zinc ferrite nanoparticles. *Bulletin of the American Physical Society*, 2012, vol. 324, iss. 4, pp. 394–402. <https://doi.org/10.1016/J.JMMM.2011.07.040>
10. Singhal S., Namgyal T., Bansal S., Chandra K. Effect of Zn Substitution on the Magnetic Properties of Cobalt Ferrite Nano Particles Prepared Via Sol-Gel Route. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 2010, vol. 2, iss. 6, pp. 376–381. <http://doi.org/10.4236/jemaa.2010.26049>
11. Rajendra S. G., Chae S. Y., Mane R. S., Han S.-H. Cobalt Ferrite Nanocrystallites for Sustainable Hydrogen Production Application. *Journal of Electrochemistry*, 2011, iss. 1, art. ID 729141. <https://doi.org/10.4061/2011/729141>
12. Chandrashekhara A., Ladole V. Cobalt Ferrite Nanocrystallites for Sustainable Hydrogen Production Application. *International Journal of Chemical Science*, 2012, vol. 10, iss. 3, pp. 1230–1234. <https://doi.org/10.4061/2011/729141>
13. Raghuvanshi S., Kane S. N., Tatarchuk T. R., Mazaleyrat F. Effect of Zn addition on structural, magnetic properties, antistructural modeling of  $\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  nano ferrite. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 1953, iss. 1, art. ID 030055. <https://doi.org/10.1063/1.5032390>
14. Haiduk Yu. S., Korobko E. V., Kotikov D. A., Svito I. A., Usenka A. E., Pankov V. V. Preparation and characterization of cobalt and cobalt-zinc ferrites for magnetorheological materials. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy = Condensed Matter and Interphases*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 19–28 (in Russian). <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9051>

15. Sawadzky G. A., Van der Woude F., Morrish A. H. Cation Distributions in Octahedral and Tetrahedral Sites of the Ferrimagnetic Spinel  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ . *Journal of Applied Physics*, 1968, vol. 39, iss. 2, pp. 1204–1206. <https://doi.org/10.1063/1.1656224>
16. Haiduk, Yu.S., Korobko E. V., Sheutsova K. A., Kotsikau D. A., Svito I. A., Usenka A. E., Ivashenka D. U., Fahmi A., Pankov V. V. Synthesis, structure and magnetic properties of cobalt-zinc nanoferrite for magnetorheological fluids. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 28–38 (in Russian). <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2526>
17. Keyu Chen, Liangchao Li, Guoxiu Tong, Ru Qiao. Fabrication and absorbing property of microwave absorber based on  $\text{BaAl}_2\text{Fe}_{10}\text{O}_{19}$  and poly(o toluidine). *Synthetic Metals*, 2011, vol. 161, iss. 21–22, pp. 2192–2198. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2011.07.019>
18. Starikov, A. Yu., Sherstyuk D. P., Sander E. E., Zhivulin V. E., Vinnik D. A. Study of the effect of aluminum substitution on the electrical properties of barium hexaferrite. *Vestnik Soveta molodykh uchenykh i spetsialistov Chelyabinskoi oblasti – Vestnik SMUS74* [Bulletin of the Council of Young Scientists and Specialists of the Chelyabinsk Region], 2018, vol. 1, no. 3, pp. 67–69 (in Russian). <https://smus74.ru/content/vypusk-3-22-2018>.
19. Kovalyov A. I., Vinnik D. A., Zhrebcev D. A., Belaya E. A. Sol-gel synthesis of nanodispersed solid solutions based on barium hexaferrite of composition  $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ . *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Khimiya" = Bulletin of the South Ural State University. Series: Chemistry*, 2023, vol. 15, no. 1, pp. 131–137 (in Russian).
20. Pullar R. C. Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics. *Progress in Materials Science*, 2012, vol. 57, iss. 7, pp. 1191–1334. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.04.001>
21. Nikmanesh H., Hoghoghifard S., Hadi-Sichami B. Study of the structural, magnetic, and microwave absorption properties of the simultaneous substitution of several cations in the barium hexaferrite structure. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 775, pp. 1101–1108. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.051>
22. Petrova E. G., Shavshukova Ya. A., Kotsikau D. A., Laznev K. V., Pankov V. V. Synthesis of nano-dimensional cobalt-zinc ferrites by the low-temperature spray-drying with subsequent thermolysis. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 406–412 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-4-406-412>
23. Auwal I. A., Unal B., Baykal A., Kurtan U., Amir M. D., Yildiz A., Sertkol M. Electrical and Dielectric Properties of  $\text{Y}^{3+}$ -Substituted Barium Hexaferrites. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2017, vol. 30, iss. 7, pp. 1813–1826. <https://doi.org/10.1007/s10948-017-3978-8>
24. Durmus Z., Unal B., Toprak M. S., Aslan A., Baykal A. Synthesis and characterization of poly(1-vinyl-1,2,4-triazole) (PVTri)-barium hexaferrite nanocomposite. *Physica B, Condensed Matter*, 2011, vol. 406, iss. 11, pp. 2298–2302. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2011.03.063>
25. Shalini M. G., Subha A., Sahu B., Sahoo S. C. Phase evolution and temperature dependent magnetic properties of nanocrystalline barium hexaferrite. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, vol. 30, pp. 13647–13654. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01734-x>
26. Feng W. J., Zhao X., Zheng W. Q., Gang J. T., Cao Y., Yang, H. Microwave Absorption Properties of  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  Prepared in Different Temperature with Poly(aniline) Nanocomposites. *Advanced Materials Research*, 2017, vol. 1142, pp. 211–215. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1142.211>
27. Chernyakova K. V., Pankov V. V., Ivanovskaya M. I., Lomonosov V. A. Structure and magnetic properties of hexagonal barium ferrite. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya = Bulletin of the Belarusian State University. Series 2. Chemistry, biology, geography*, 2008, no. 1, pp. 9–13 (in Russian).
28. Zahari M. H., Guan B. H., Chuan L. K. Structural and magnetic properties of hexagonal barium ferrite synthesized through the sol-gel combustion route. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1787, iss. 1, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1063/1.4968136>

### Информация об авторах

Гайдук Юлиан Станиславович – кандидат химических наук, заведующий лабораторией. Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 14, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: j\_hajduk@list.ru

Коробко Евгения Викторовна – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Беларусь). E-mail: evkorobko@gmail.com

Голодок Роберт Петрович – научный сотрудник. Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа НАН Беларуси (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Беларусь). E-mail: robertgolodok@mail.ru

Усенко Александра Евгеньевна – кандидат химических наук, заведующий кафедрой. Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 14, 220030, Минск, Беларусь). E-mail: usenka@bsu.by

Паньков Владимир Васильевич – доктор химических наук, профессор, профессор кафедры. Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 14, 220030, Минск, Беларусь). E-mail: pankov@bsu.by

### Information about the authors

Haiduk Yulyan S. – Ph. D. (Chemistry), Head of the Laboratory. Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: j\_hajduk@list.ru

Korobko Evgenia V. – D. Sc. (Engineering), Head of the Laboratory. Institute of Heat and Mass Transfer named after A. V. Lykov of the National Academy of Sciences of Belarus (15, Brovko Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: evkorobko@gmail.com

Golodok Robert P. – Researcher. Powder metallurgy institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: robertgolodok@mail.ru

Usenka Alexandra E. – Ph. D. (Chemistry), Head of the Department. Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: usenka@bsu.by

Pankov Vladimir V. – D. Sc. (Chemistry), Professor, Professor of the Department. Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pankov@bsu.by