

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ. БИОТЕХНОЛОГИИ

CHEMICAL ENGINEERING. BIOTECHNOLOGIES

УДК 546.723; 532.135

Н. А. Журавский¹, Е. В. Коробко¹, Л. С. Ещенко², Р. А. Воронцов², Л. С. Щерба²

¹Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

²Белорусский государственный технологический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ СУСПЕНЗИЙ С ДИСПЕРСНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ НА ОСНОВЕ СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА

Методами периодического и непрерывного химического осаждения получены сложные железосодержащие оксиды – ферриты кобальта, цинка, железа и марганца (CoFe_2O_4 , ZnFe_2O_4 , FeFe_2O_4 , MnFe_2O_4). Для комплексного анализа полученных соединений применены физико-химические методы исследования. Методом сканирующей электронной микроскопии изучены химический состав, размеры и форма частиц. Рентгенофазовым анализом установлен фазовый состав синтезированных соединений. Полученные ферриты являются полидисперсными порошками с узким распределением частиц по размерам. Обнаружено, что режим осаждения не оказывает существенного влияния на конечный химический состав синтезируемых ферритов, но влияет на размер частиц. При непрерывном осаждении образуются более крупные в сравнении с периодическим режимом осаждения частицы ферритов. На основе синтезируемых соединений приготовлены магнитореологические суспензии, для которых определены кривые течения в магнитном поле и при его отсутствии. Показано преимущество феррита марганца MnFe_2O_4 перед другими синтезируемыми соединениями, которое заключается в более высоком напряжении сдвига в суспензиях, что позволяет использовать его в качестве функционального наполнителя магнитореологических суспензий.

Ключевые слова: магнитореологическая суспензия, дисперсная фаза, наполнитель, железосодержащие оксиды, ферриты, дисперсность.

Для цитирования: Журавский Н. А., Коробко Е. В., Ещенко Л. С., Воронцов Р. А., Щерба Л. С. Исследование магнитореологических суспензий с дисперсными наполнителями на основе сложных оксидов железа // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, полимерное материаловедение. 2026. № 1 (301). С. 5–13.

DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-1.

N. A. Zhuravskii¹, E. V. Korobko¹, L. S. Eshchenko², R. A. Vorontsov², L. S. Shcherba²

¹Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus

²Belarusian State Technological University

STUDY OF MAGNETORHEOLOGICAL SUSPENSIONS WITH DISPERSED FILLERS BASED ON COMPLEX IRON OXIDES

Complex iron-containing oxides – cobalt, zinc, iron, and manganese ferrites (CoFe_2O_4 , ZnFe_2O_4 , FeFe_2O_4 , MnFe_2O_4) – were synthesized using periodic and continuous chemical deposition methods. A range of physico-chemical research methods was applied for the comprehensive analysis of the obtained compounds. Scanning electron microscopy was used to study their chemical composition, particle size, and shape. The phase composition of the synthesized compounds was determined by X-ray phase analysis. The resulting ferrites are polydisperse powders with a narrow particle size distribution. It was established that the deposition mode does not significantly affect the final chemical composition of the synthesized

ferrites but does influence the particle size. Larger ferrite particles are formed during continuous deposition compared to the periodic deposition mode. Magnetorheological suspensions were prepared based on the synthesized compounds, and their flow curves were determined both in the presence and in the absence of a magnetic field. The advantage of manganese ferrite (MnFe_2O_4) over other synthesized compounds was demonstrated, which lies in its higher shear stress in suspensions, allowing it to be used as a functional filler for magnetorheological suspensions.

Keywords: magnetorheological suspension, dispersed phase, filler, iron-containing oxides, ferrites, dispersion.

For citation: Zhuravskii N. A., Korobko E. V., Eshchenko L. S., Vorontsov R. A., Shcherba L. S. Study of magnetorheological suspensions with dispersed fillers based on complex iron oxides. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Polymer Materials Science*, 2026, no. 1 (301), pp. 5–13 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-1.

Введение. Согласно [1–5], магнитореологические жидкости (МРЖ), квазигомогенные жидкие дисперсии, изменяющие реологические характеристики под действием внешнего магнитного поля, находят широкое применение в многочисленных устройствах различного типа и назначения, например в системах виброзащиты, гидроавтоматики, муфтах, клапанах и др. В качестве основного дисперсного наполнителя в МРЖ, как правило, используются ферромагнитные частицы карбонильного железа [6–11]. В то же время применение в составе комплексной дисперсной фазы в качестве магнитного наполнителя, помимо карбонильного железа, частиц оксидов металлов способно синергетически усиливать магнитоуправляемость жидкостей [12].

Синтез наноразмерных соединений, в том числе оксидов и ферритов, осуществляют различными способами: сольвотермальным [13], сонохимическим [14], методом соосаждения [15], золь-гель-методом [16]. Сложные оксиды железа являются ферритмагнитными материалами, у которых магнитные моменты атомов различных подрешеток ориентируются антипараллельно, но моменты подрешеток не равны, и, тем самым, результирующий момент не равен нулю. Одна подрешетка состоит из ионов железа Fe^{3+} , вторая – из ионов Me^{2+} (Co^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+}). В отличие от ферромагнетиков, они имеют высокое значение удельного сопротивления, меньшую величину индукции насыщения, более сложную температурную зависимость индукции [17–21].

Цель настоящего исследования – изучение влияния состава магнитореологических жидкостей, которые являются микрогетерогенной системой с дисперсной средой в виде сложных оксидов железа, на их магнитореологические свойства.

Основная часть. Получение сложных железосодержащих оксидов осуществляли методом химического осаждения в периодическом и непрерывном режимах с последующими стадиями старения, фильтрации, отмывки и термообработки. В качестве исходных реагентов использовали водорастворимые соли кобальта (II), цинка (II), железа (II) и железа (III), марганца (II).

При осаждении ферритов периодическим методом процесс проводили следующим образом. Раствор соли двухвалентного металла смешивали с раствором сульфата железа (III). Массовое соотношение $\text{Fe}^{3+} : \text{Me}^{2+}$ в растворе соответствовало 2 : 1. Массовая доля солей в приготовленных растворах хлоридов кобальта (II), цинка (II), марганца (II), сульфатов железа (II) и железа (III) составляла 10,0 мас. %, что в пересчете на содержание металлов Co, Zn, Mn, Fe (II) и Fe (III) равно 4,54; 4,79; 4,36; 3,68; 2,8 мас. % соответственно. В качестве осадителя использовали раствор гидроксида натрия NaOH с массовой долей 30 мас. %. Раствор NaOH через дозирующее устройство (расход 5–7 мл/мин) подавали в лабораторный реактор, в котором предварительно смешивали растворы соли двухвалентного металла и сульфата железа (III). Осаждение проводили при температуре 80–90°C и интенсивном перемешивании реакционной смеси. После достижения pH среды 14,0–14,5 подачу раствора NaOH прекращали, образующуюся суспензию выдерживали в термостате при 90–95°C

и перемешивании в течение 3 ч. После этого осадок отделяли от жидкой фазы, промывали до отрицательной реакции на хлорид- или сульфат-анионы и сушили.

При непрерывном методе осаждения осуществляли одновременную подачу раствора солей и основания в лабораторный реактор и отвод образующейся суспензии. Процесс осаждения проводили при постоянном значении рН среды, равном 14,0–14,5, которое поддерживали расходом подаваемых кислых (3–5 мл/мин) и щелочных растворов (8–10 мл/мин). Последующими стадиями после осаждения ферритов явились старение, фильтрация, отмывка, сушка, термообработка. Условия проведения процессов на данных стадиях были идентичны условиям на данных стадиях при получении ферритов периодическим методом осаждения.

На основе синтезированных соединений приготавливали наполнители для магнито-реологических суспензий следующим образом. Синтезированные соединения сушили при температуре 100–105°C до постоянной массы, затем просеивали через сито с размером ячеек 0,063 мм и помещали в герметично закрытую тару. Приготовление магнито-реологических суспензий сводилось к смешению наполнителя, который является дисперсной фазой, с дисперсионной средой при массовом соотношении 30 мас. % наполнителя, 70 мас. % минерального масла.

Химический состав, размер и форму частиц магнитных порошков определяли методом резонансно-электронной микроскопии с использованием сканирующего электронного микроскопа JEOL 5610 LV с микроанализатором по площади. Установление фазового состава образцов осуществляли методом рентгенофазового анализа. Запись рентгенограмм проводили с помощью рентгеновского дифрактометра D8 Advance фирмы Bruker (США) с медным анодом ($\text{CuK}\alpha$ -излучение, $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$). Кривые течения в магнитном поле строили с применением ротационного вискозиметра HAAKE RV 12, снабженного индуктором магнитного поля, в диапазоне скоростей сдвига 0,5–268 c^{-1} и в диапазоне напряженностей магнитного поля 80–500 кА/м, зазор между пластинами составлял 0,2 мм. Кривые течения в отсутствие поля строили на вискозиметре Rheotest 2.1 в диапазоне скоростей сдвига 3–1312 c^{-1} .

Характеристика синтезированных сложных железосодержащих оксидов представлена в таблице. Согласно экспериментальным данным, при химическом осаждении образуется суспензия с плохоотстаивающейся твердой фазой, независимо от способа осаждения. По мере старения осадка, т. е. выдерживания суспензии при температуре 90–95°C в течение 3 ч, наблюдается уплотнение твердой фазы и появление четкой границы раздела фаз. При этом отмечено изменение окраски реакционной смеси, что свидетельствует о протекании ряда физико-химических процессов, связанных с образованием и формированием стабильных металлооксидных фаз в исследуемых системах. По результатам химического анализа синтезированных образцов видно, что для твердой фазы сохраняется практически такое же мольное соотношение $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{MeO}$ ($\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{MeO} = 2 : 1$, где Me – это Co (II), Zn (II), Fe (II), Mn (II)), как и в реакционной смеси при осаждении. При этом способ осаждения не оказывает существенного влияния на химический состав синтезированных соединений. Следует отметить, что наблюдается различие в дисперсности – прослеживается небольшое увеличение частиц осадка при его получении в непрерывном режиме осаждения, что может быть связано с агрегированием мелких частиц, образующихся за счет более высокого пересыщения в системе при одновременном сливании реагентов.

Согласно результатам рентгенофазового анализа, полученные железосодержащие оксиды являются как индивидуальными веществами (образцы № 1 и 4), так и состоят из смеси соединений (образцы № 2 и 3). Фазовый состав образца № 1 представлен одной кристаллической фазой – сложным оксидом типа феррита CoFe_2O_4 . В составе образца № 2 присутствуют две кристаллические фазы: франклинит ZnFe_2O_4 , также являющийся сложным оксидом типа феррита, и сложный оксид переменного состава $\text{Fe}_{0,85-x}\text{Zn}_x\text{O}$, в котором на единицу массы железа может приходиться от 0 до 0,18 единиц массы цинка. Фазовый состав образца № 3 представлен двумя кристаллическими фазами – магнетитом FeFe_2O_4 и

гетитом $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, образца № 4 – яacobсидом MnFe_2O_4 . Рентгенограммы образцов № 1–4 приведены на рис. 1.

Необходимым условием для применения ферритов в качестве дисперсной фазы магнитных жидкостей является их дисперсность, а именно размер частиц должен находиться на уровне 10–30 нм, поскольку магнитная жидкость должна сохранять стабильность в течение длительного времени эксплуатации. Анализ размера частиц синтезированных образцов показал, что все они являются высокодисперсными веществами. Характерно, что основным фактором, влияющим на размер частиц и их распределение по размерам, выступает природа соли металла. Индивидуальные соединения, в частности CoFe_2O_4 и MnFe_2O_4 , характеризуются содержанием частиц с меньшим размером по сравнению с образцами, содержащими две кристаллические фазы. Минимальным размером обладают частицы феррита марганца. Электронные снимки образцов № 1–4 представлены на рис. 2.

Характеристика сложных железосодержащих оксидов

Способ осаждения	Номер образца	Химический состав, мас. %		Фазовый состав	Размер частиц, мкм
		MeO*	Fe_2O_3		
Периодический	1	35,64	64,36	CoFe_2O_4	1,0–5,0
	2	33,52	66,48	ZnFe_2O_4 (франклинит), $\text{Fe}_{0,85-x}\text{Zn}_x\text{O}$	2,0–10,0
	3	30,40	69,60	FeFe_2O_4 (магнетит), $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (гетит)	1,0–8,0
	4	36,41	63,59	MnFe_2O_4 (яacobсид)	0,1–1,0
Непрерывный	5	35,70	64,30	CoFe_2O_4	1,0–7,0
	6	33,55	66,45	ZnFe_2O_4 (франклинит), $\text{Fe}_{0,85-x}\text{Zn}_x\text{O}$	2,0–15,0
	7	30,37	69,63	FeFe_2O_4 (магнетит), $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (гетит)	1,0–10,0
	8	36,44	63,56	MnFe_2O_4 (яacobсид)	0,5–1,1

* Здесь Me – Co (II), Zn (II), Fe (II), Mn (II) для образцов № 1–8.

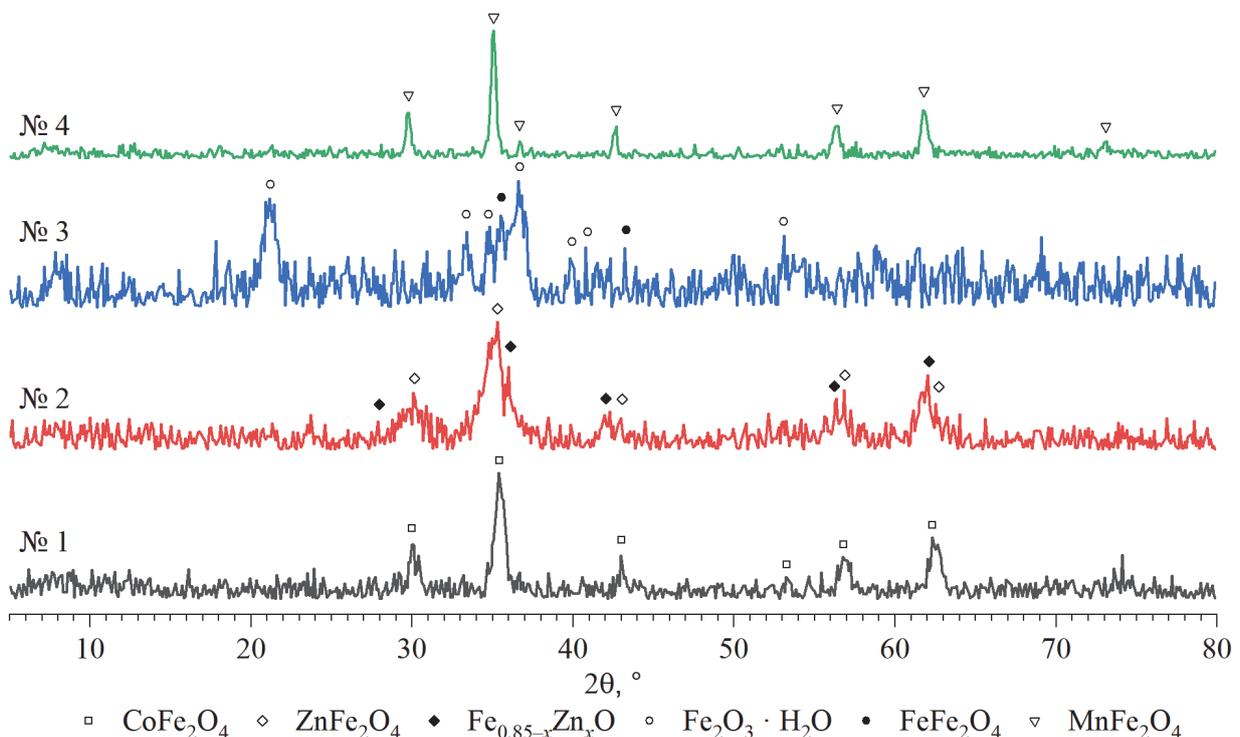


Рис. 1. Рентгенограммы образцов № 1–4 (нумерация согласно таблице)

На электронном снимке образца № 1 видно, что в составе данного соединения присутствуют мелкая фракция и агломераты неправильной формы (рис. 2). Размеры частиц для данного образца находятся в диапазоне 1,0–5,0 мкм. В образцах № 2 и 3 размер частиц выше и составляет 2,0–10,0 и 1,0–8,0 мкм соответственно. При этом, как видно из рис. 2, имеется большое количество агломератов, содержание мелкой фракции небольшое. Образец № 4, в отличие от предыдущих образцов, можно охарактеризовать как практически монодисперсный с размером частиц, не превышающем 1,0 мкм.

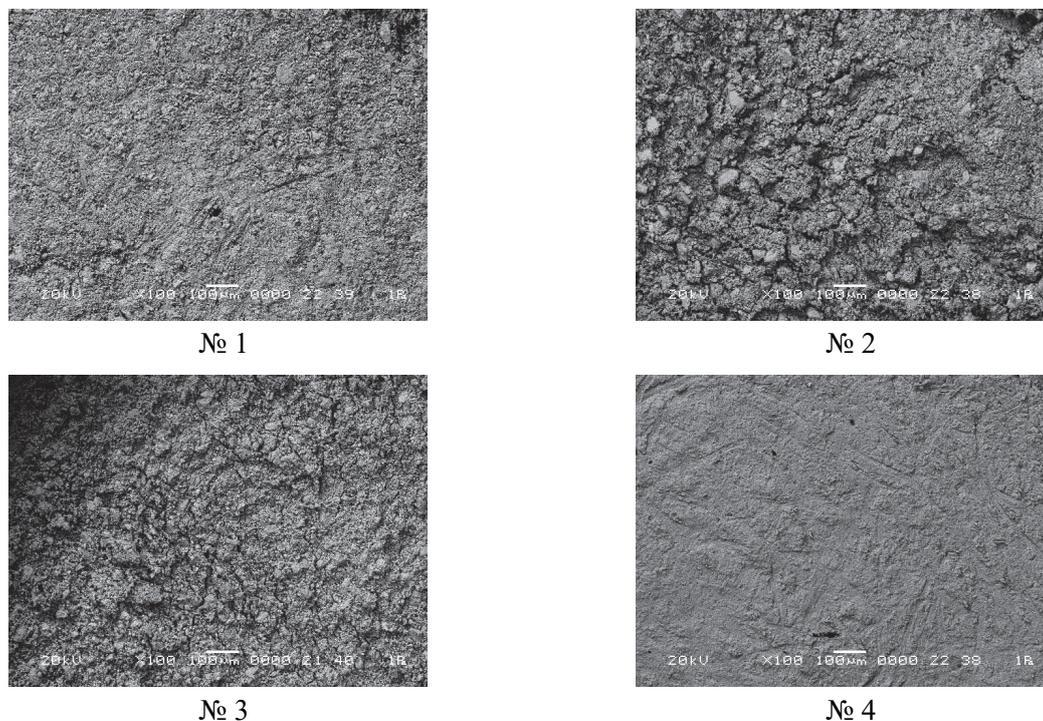


Рис. 2. Электронные снимки образцов № 1–4 (нумерация согласно таблице)

В качестве наполнителей для магнитореологических суспензий исследовали образцы № 1–4. Для сравнения реологических характеристик суспензий, приготовленных на основе синтезированных образцов, определены зависимости предела текучести τ_0 и эффективной вязкости η при фиксированной скорости сдвига 35 с^{-1} от напряженности магнитного поля (рис. 3).

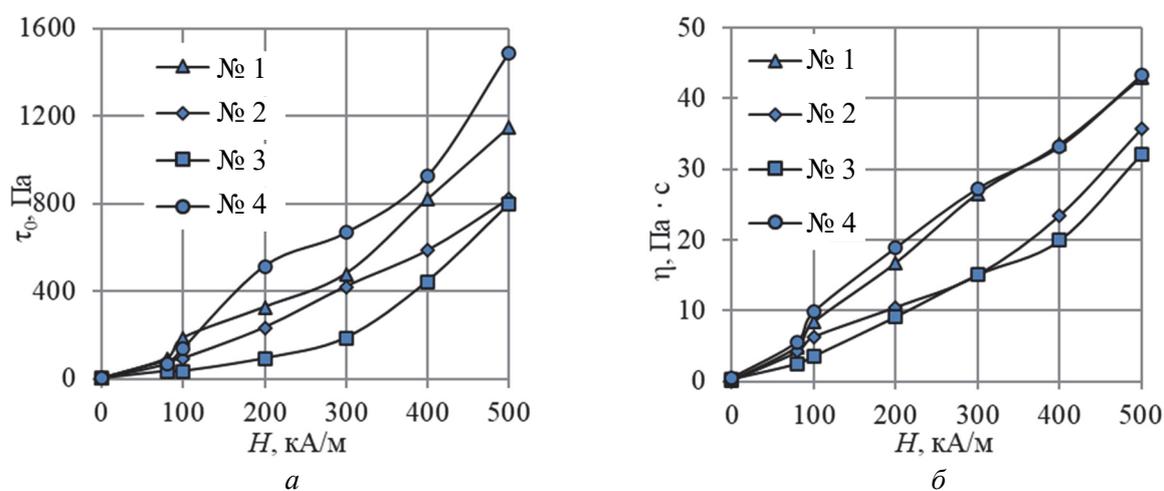


Рис. 3. Зависимость реологических характеристик суспензий на основе образцов № 1–4 от напряженности магнитного поля:
 а – предела текучести; б – эффективной вязкости при скорости сдвига 35 с^{-1}

Из анализа экспериментальных данных следует, что прирост реологических характеристик (предела текучести, напряжения сдвига, эффективной вязкости) в магнитном поле можно представить последовательностью в порядке $\text{FeFe}_2\text{O}_4 - \text{ZnFe}_2\text{O}_4 - \text{MnFe}_2\text{O}_4 - \text{CoFe}_2\text{O}_4$ (№ 3 – № 2 – № 4 – № 1). Однако поскольку марганцевый наполнитель № 4 обладает высокой вязкостью в отсутствие поля, он показывает абсолютные значения реологических характеристик, даже превышающие значения кобальтового образца № 1, что более заметно на примере предела текучести (рис. 3): 1480 Па против 1180 Па при напряженности магнитного поля 500 кА/м.

Обобщая полученные результаты, следует заметить, что хотя прирост реологических величин в магнитном поле у суспензий на основе оксидных ферритмагнитных наполнителей не столь высок, как у МРЖ на основе ферромагнитных наполнителей, их диапазон регулирования в магнитном поле превышает два порядка, что может быть достаточным в ряде случаев, например при уплотнении валов. Преимуществом этих материалов является их высокое удельное сопротивление по сравнению с ферромагнитными наполнителями и с магнетитом, что позволяет их использовать в переменном магнитном поле без энергетических потерь на вихревые токи. Кроме того, сложные оксидные наполнители можно применять в электрических полях высокой напряженности в качестве магниточувствительной компоненты комплексной дисперсной фазы магнитоэлектрореологических жидкостей, чувствительных к воздействию и электрического, и магнитного поля, а также в качестве компоненты дисперсной фазы магнитореологических полировальных жидкостей.

Заключение. Методом осаждения в периодическом и непрерывном режимах получены ферриты кобальта (CoFe_2O_4), цинка (ZnFe_2O_4), железа (FeFe_2O_4), марганца (MnFe_2O_4) с преобладающим размером частиц 0,1–10,0 мкм. Установлена зависимость эффективной вязкости при фиксированной скорости сдвига 35 с^{-1} и предела текучести магнитореологических суспензий от напряженности магнитного поля и показано, что наибольший предел текучести характерен для наполнителей на основе индивидуальных ферритов марганца и кобальта. Феррит марганца (MnFe_2O_4) является перспективной дисперсной фазой для магнитореологических суспензий, поскольку данный наполнитель обладает преимуществами по сравнению с другими синтезируемыми веществами.

Список литературы

1. Ahamed R., Choi S. B., Ferdous M. M. A state of art on magnetorheological materials and their potential applications // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2018. Vol. 29, no. 10. P. 2051–2095. DOI: 10.1177/1045389X18754350.
2. Vicente J. de, Klingenberg D. J., Hidalgo-Alvarez R. Magnetorheological fluids: a review // *Soft Matter*. 2011. Vol. 7, no. 8. P. 3701–3710. DOI: 10.1039/C0SM01221A.
3. Recent structural developments and applications of magnetorheological dampers (MRD): a review / Y. Zhang [et al.] // *Magnetochemistry*. 2023. Vol. 9. P. 90. DOI: 10.3390/magnetochemistry9040090.
4. Магнитореологические жидкости: технологии создания и применение: монография / Е. С. Беляев [и др.]. Н. Новгород: НГТУ им. П. Е. Алексеева, 2017. 94 с. DOI: 10.18411/vntr18-VOL7.
5. Особенности получения электрореологически активного феррифосфата / Л. С. Ещенко [и др.] // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*. 2020. № 3. С. 155–169. DOI: 10.15593/2224-9400/2020.3.11.
6. Синтез и физико-химические свойства твердых растворов $\text{Mn}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ / А. С. Корсакова [и др.] // *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2020. Т. 22, № 4. С. 466–472. DOI: 10.17308/kcmf.2020.22/3076.
7. Магнитореологические жидкости на основе звездообразного и линейного полидиметилсилоксана / С. А. Костров [и др.] // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2021. Т. 63, № 3. С. 198–209. DOI: 10.31857/S230811202103007X.

8. Ghaffari A., Hashemabadi S. H., Ashtiani M. A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2014. Vol. 26, no. 8. P. 881–904. DOI: 10.1177/1045389X14546650.
9. Kordonsky W. Magnetorheological Fluids and Their Applications // *Materials Technology*. 1993. Vol. 8, no. 11–12. P. 240–242. DOI: 10.1080/10667857.1993.11784991.
10. Кавитатор для производства магнитореологической суспензии / Б. А. Гордеев [и др.] // *Вестник машиностроения*. 2023. № 6. С. 499. DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-6499-504.
11. Модель поведения магнитореологической жидкости / Л. В. Маркова [и др.] // *Математическое и компьютерное моделирование: сб. материалов XI Междунар. науч. конф., посвящ. памяти В. А. Романькова, Омск, 15 марта 2024 г. Омск, 2024. С. 47–48.*
12. Fang F. F., Hyoung J. C., Myung S. J. Magnetorheology of soft magnetic carbonyl iron suspension with single-walled carbon nanotube additive and its yield stress scaling function // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2009. Vol. 351. Issues 1–3. P. 46–51. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2009.09.032.
13. Synthesis of Amino-Functionalized Biochar/Spinel Ferrite Magnetic Composites for Low-Cost and Efficient Elimination of Ni (II) from Wastewater / Z. Guo [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 722. P. 137822. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137822.
14. Design and Investigation of Sono-Chemical Synthesis of Pure and Sn Doped CoFe₂O₄ Nanoparticles and Their Structural and Magnetic Properties / V. Balasubramani [et al.] // *Inorganic Chemistry Communications*. 2023. Vol. 155. P. 111015. DOI: 10.1016/j.inoche.2023.111015.
15. Facile Synthesis and Characterisations of Cobalt Ferrite-SilverGraphene Oxide Nanocomposite in Enhancing Electrochemical Response Capacity / V.-T. Hoang [et al.] // *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*. 2022. Vol. 13, no. 3. P. 035002. DOI: 10.1088/20436262/13/3/035002.
16. Изучение условий получения феррита кобальта (II) на поверхности биочара / Н. П. Шабельская [и др.] // *Неорганические материалы*. 2024. Т. 60, № 2. С. 249–256. DOI: 10.31857/S0002337X24020131.
17. Синтез, структура и магнитные свойства Mn-замещенного магнетита для магнитореологических материалов / Ю. С. Гайдук [и др.] // *Журнал неорганической химии*. 2024. Т. 69, № 7. С. 973–980. DOI: 10.31857/S0044457X24070049.
18. Вест А. Химия твердого тела. Теория и приложения: в 2 ч. М.: Мир, 1988. Ч. 1. 558 с.
19. Летюк Л. Н., Журавлев Г. И. Химия и технология ферритов. Л.: Химия, 1983. 220 с.
20. Технология производства материалов магнитоэлектроники / Л. Н. Летюк [и др.]. М.: Металлургия, 1994. 354 с.
21. Крупицка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов: в 2 т. М.: Мир, 1976. Т. 2. 504 с.

References

1. Ahamed R., Choi S. B., Ferdaus M. M. A state of art on magnetorheological materials and their potential applications. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, vol. 29, no. 10, pp. 2051–2095. DOI: 10.1177/1045389X18754350.
2. Vicente J. de, Klingenberg D. J., Hidalgo-Alvarez R. Magnetorheological fluids: a review. *Soft Matter*, 2011, vol. 7, no. 8, pp. 3701–3710. DOI: 10.1039/C0SM01221A.
3. Zhang Y., Guo J., Yang J., Li X. Recent structural developments and applications of magnetorheological dampers (MRD): a review. *Magnetochemistry*, 2023, vol. 9, p. 90. DOI: 10.3390/magnetochemistry9040090.
4. Belyaev E. S., Ermolaev A. I., Titov E. Yu., Tumakov S. F. *Magnitореологические жидкости: технологии создания и применения: монография* [Magnetoreological Liquids: Technologies of Creation and Application: monograph]. Nizhny Novgorod, NGTU im. R. E. Alekseeva Publ., 2017. 94 p. DOI: 10.18411/vntr18-VOL7 (In Russian).

5. Yeshchenko L. S., Ponyatovsky O. V., Vecherskaya E. I., Korobko E. V., Novikova Z. A. Features of obtaining electrorheologically active ferriphosphate. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology], 2020, no. 3, pp. 155–169. DOI: 10.15593/2224-9400/2020.3.11 (In Russian).
6. Korsakova A. S., Kotikov D. A., Haiduk Yu. S., Pankov V. V. Synthesis and Physicochemical Properties of $Mn_xFe_{3-x}O_4$ Solid Solutions. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy* [Condensed Matter and Interphases], 2020, vol. 22, no. 4, pp. 466–472. DOI: 10.17308/kcmf.2020.22/3076 (In Russian).
7. Kostrov S. A., Tikhonov P. A., Muzafarov A. M., Kramarenko E. Y. Magnetorheological Fluids Based on Star-Shaped and Linear Polydimethylsiloxanes. *Vysokomolekulyarnyye soedineniya* [Polymer Science], series A, 2021, vol. 63, no. 3, pp. 198–209. DOI: 10.31857/S230811202103007X (In Russian).
8. Ghaffari A., Hashemabadi S. H., Ashtiani M. A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2014, vol. 26, no. 8, pp. 881–904. DOI: 10.1177/1045389X14546650.
9. Kordonsky W. Magnetorheological Fluids and Their Applications. *Materials Technology*, 1993, vol. 8, no. 11–12, pp. 240–242. DOI: 10.1080/10667857.1993.11784991.
10. Gordeev B. A., Ivanov E. G., Okhulkov S. N., Ermolaev A. I., Plekhov A. S. Cavitator for the production of magnetorheological suspension. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 2023, no. 6, p. 499. DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-6499-504 (In Russian).
11. Markova L. V., Zhuravsky N. A., Korobko E. V., Radkevich L. V. Model of magnetorheological fluid behavior. *Matematicheskoye i komp'yuternoye modelirovaniye: sbornik materialov XI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati V. A. Roman'kova* [Mathematical and computer modeling: collection of materials of the XI International scientific conference dedicated to the memory of V. A. Romankov]. Omsk, 2024, pp. 47–48 (In Russian).
12. Fang F. F., Hyoung J. C., Myung S. J. Magnetorheology of soft magnetic carbonyl iron suspension with single-walled carbon nanotube additive and its yield stress scaling function. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2009, vol. 351, issues 1–3, pp. 46–51. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2009.09.032.
13. Guo Z., Chen R., Yang R., Yang F., Chen J., Li Y., Zhou R., Xu J. Synthesis of Amino-Functionalized Biochar/Spinel Ferrite Magnetic Composites for Low-Cost and Efficient Elimination of Ni (II) from Wastewater. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 722, p. 137822. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137822.
14. Balasubramani V., Mowlika V., Sivakumar A., Sdran N. A., Maiz F., Shkir M. Design and Investigation of Sono-Chemical Synthesis of Pure and Sn Doped $CoFe_2O_4$ Nanoparticles and Their Structural and Magnetic Properties. *Inorganic Chemistry Communications*, 2023, vol. 155, p. 111015. DOI: 10.1016/j.inoche.2023.111015.
15. Hoang V.-T., Trang N. L. N., Nga D. T. N., Ngo X.-D., Pham T. N., Tran V. T., Mai M., Tam L. T., Tri D. Q., Le A.-T. Facile Synthesis and Characterisations of Cobalt Ferrite-Silver Graphene Oxide Nanocomposite in Enhancing Electrochemical Response Capacity. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2022, vol. 13, no. 3, p. 035002. DOI: 10.1088/20436262/13/3/035002.
16. Shabelskaya N. P., Radzhabov A. M., Egorova M. A., Arzumanova A. V., Ulyanova V. A. Study of conditions for obtaining cobalt (II) ferrite on the surface of biochar. *Neorganicheskiye materialy* [Inorganic materials], 2024, vol. 60, no. 2, pp. 249–256. DOI: 10.31857/S0002337X24020131 (In Russian).
17. Haiduk Yu. S., Korobko E. V., Radkevich L. V., Golodok R. P., Usenka A. E., Pankov V. V. Synthesis, structure and magnetic properties of Mn-substituted magnetite for magnetorheological materials. *Zhurnal neorganicheskoy khimii* [Journal of Inorganic Chemistry], 2024, vol. 69, no. 7, pp. 973–980. DOI: 10.31857/S0044457X24070049 (In Russian).
18. West A. *Khimiya tverdogo tela. Teoriya i prilozheniya* [Solid State Chemistry. Theory and Applications]: in 2 parts. Moscow, Mir Publ., 1988. Part 1. 558 p. (In Russian).

19. Letyuk L. N., Zhuravlev G. I. *Khimiya i tekhnologiya ferritov* [Chemistry and technology of ferrites]. Leningrad, Khimiya Publ., 1983. 220 p. (In Russian).

20. Letyuk L. N., Balbashov A. M., Krutochin D. G., Gonchar A. V. *Tekhnologiya proizvodstva materialov magnitoelektroniki* [Technology of production of magnetoelectronic materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1994. 354 p. (In Russian).

21. Krupichka S. *Fizika ferritov i rodstvennykh im magnitnykh okislov* [Physics of ferrites and related magnetic oxides]: in 2 vol. Moscow, Mir Publ., 1976. Vol. 2. 504 p. (In Russian).

Информация об авторах

Журавский Николай Анатольевич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией реофизики и макрокинетики. Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: mikalai.zhur@tut.by. SPIN-код: 4573-2310. Scopus ID: 25926799300. ORCID: 0000-0002-9382-9154.

Коробко Евгения Викторовна – доктор технических наук, профессор. Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: evkorobko@gmail.com. Scopus ID: 7004143195.

Ещенко Людмила Семеновна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: yeshchanko@belstu.by. SPIN-код: 9650-1493. Scopus ID: 6602296655.

Воронцов Роман Александрович – аспирант кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: rvorontsov97@gmail.com. SPIN-код: 7094-2409. ORCID: 0009-0009-1572-4187.

Щерба Людмила Сергеевна – магистрант кафедры технологии стекла, керамики и вяжущих материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: l.shcherba@bck.by.

Information about the authors

Zhuravskii Nikolay Anatol'yevich – PhD (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory of Rheophysics and Macrokinetics. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus (15 P. Brovki str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mikalai.zhur@tut.by. SPIN code: 4573-2310. Scopus ID: 25926799300. ORCID: 0000-0002-9382-9154.

Korobko Evgeniya Viktorovna – DSc (Engineering), Professor. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus (15 P. Brovki str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: evkorobko@gmail.com. Scopus ID: 7004143195.

Eshchenko Lyudmila Semyonovna – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Inorganic Materials Technology and General Chemical Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yeshchanko@belstu.by. SPIN code: 9650-1493. Scopus ID: 6602296655.

Vorontsov Roman Aleksandrovich – PhD student, the Department of Inorganic Materials Technology and General Chemical Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rvorontsov97@gmail.com. SPIN code: 7094-2409. ORCID: 0009-0009-1572-4187.

Shcherba Lyudmila Sergeevna – Master's degree student, the Department of Glass, Ceramics and Binding Materials Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: l.shcherba@bck.by.

Поступила 04.11.2025