

УДК 532.54

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МОДЕЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД ПРИ МАГНИТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

© 2024 г. Е. В. Бондарь¹, Е. В. Шельдешова¹, И. А. Шабанова¹, П. А. Ряполов¹, *

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет», Курск, Россия

*E-mail: r-piter@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.01.2024

После доработки 29.04.2024

Принята к публикации 28.06.2024

Рассмотрена модельная среда из частиц магнетита микронного размера и металлических шариков диаметром 1 мм в вязкой среде — глицерине. Рассмотрены процессы организации данной системы во внешнем магнитном поле при его увеличении. Также рассмотрено воздействие сдвиговых колебаний на процессы формирования структуры в исследуемых системах. Полученные данные могут послужить основой для моделирования динамики дисперсных систем и расширения представления об их поведении и организации в магнитных полях и при механических воздействиях.

Ключевые слова: магнитная жидкость, магнитореологическая жидкость, модельная среда, цепочечные структуры, магнитное поле

DOI: 10.31857/S0367676524100237, **EDN:** FNQJNU

ВВЕДЕНИЕ

Магнитные жидкости (МЖ) — это коллоидные растворы, которые характеризуются стабильностью и содержат наночастицы магнитных материалов, диспергированные в жидких средах. Магнитные жидкости относятся к категории жидкостей, и их движение подчиняется закону гидродинамики. Магнитные жидкости также проявляют магнетизм; следовательно, их поведение контролируется магнитным полем, а их магнитные свойства подчиняются законам электромагнетизма. Основой специфических свойств магнитных жидкостей является возможность управлять их потоком и физическими характеристиками с помощью магнитных полей. Необходимость получения магнитных жидкостей с более выраженным откликом на внешнее поле приводит к увеличению магнитного момента отдельных частиц, следовательно, к усилению магнито-дипольного взаимодействия и эффектов, связанных с ним. Одной из главных особенностей структуры МЖ с интенсивным магнито-дипольным взаимодействием является образование агрегатов магнитных частиц, имеющих форму цепочек.

Реологические свойства зависят от микроструктуры, которая формируется в присутствии магнитного поля и отличается в разных магнитоиджидкостных системах в зависимости от таких факторов, как объемная доля, размер и полидисперсность частиц, тип базовой жидкости, температура, скорость сдвига, сила

приложенного магнитного поля и т. д. Наибольшее влияние на вязкость магнитной жидкости оказывает образование цепочечных структур. Было проведено множество исследований по увеличению магнито-вязкого эффекта (МВЭ) путем манипулирования структурой магнитной жидкости, их физическими и химическими свойствами.

Магнитореологическая жидкость представляет собой суспензию намагничиваемых частиц микронного размера, погруженных в немагнитную жидкость. Жидкость демонстрирует уникальную способность претерпевать быстрые, значительные и почти полностью обратимые изменения механических свойств при приложении внешнего магнитного поля. Реология магнитоиджидкостных суспензий является предметом экспериментальных и теоретических исследований. Известны работы по исследованию вязкости магнитореологических суспензий в сдвиговых течениях. Например, в работе [1] используется линейный осциллятор, погруженный в магнитореологическую суспензию во внешнем магнитном поле, где наблюдается тенденция к увеличению вязкости вместе с увеличением напряженности магнитного поля. В работе [2] используется ротационный вискозиметр для исследования вязкости суспензии. Сравнение теоретических и экспериментальных исследований по зависимости модуля упругости среды от скорости сдвиговых течений представлены в работе [3].

Существуют системы, содержащие как наночастицы, так и частицы микронных размеров. Это крупнодисперсные суспензии ферромагнитных частиц, в которых жидкой средой является магнитная жидкость. В работах [4–6] показано, что данные системы могут обладать коллоидной стабильностью и характеризоваться приращением вязкости в магнитном поле. В магнитореологических суспензиях в сдвиговых течениях также наблюдается магнитовязкий эффект [7, 8].

Динамика композитных магнитных сред является актуальным исследованием среди ученых [9–13]. Происходит развитие технологий синтеза коллоидов со специфическими поверхностно-активными веществами, появление работ по адресной доставке лекарств, развитие микрофлюидных систем. При этом магнитная жидкость и магнитные эмульсии протекают по узким каналам в условиях пространственного ограничения, и прогнозирование реологии подобных систем является важной задачей. В этих системах, при воздействии внешних магнитных полей возникают пристеночные слои, в которых образуются структуры, оказывающие значительное влияние на динамику процесса. Существует большое количество работ в компьютерном моделировании, которые демонстрируют процесс организации формирования структур, однако визуальные наблюдения в модельных средах динамики организации подобных систем и поведения при сдвиговых колебаниях отсутствуют.

Нашей целью является исследование организации магнитных частиц и магнитных шариков, моделирующих крупные частицы в условиях комбинированных магнитных и сдвиговых воздействий. Данная система дает представление о динамике данных частиц и о сдвиговых колебаниях, происходящих на цепочках в условиях градиентного сдвигового течения. Здесь центральная часть движется как сплошное целое, а в пристеночной области возникает градиентное течение, приводящее к колебанию цепочек.

В работе [14] был предложен эксперимент по исследованию динамики системы из 2 видов шариков размером 5 и 2 мм при включении магнитного поля. Однако данная система рассматривает только процесс включения магнитного поля без учета изменения его величины и сдвиговых воздействий.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования динамики модельной среды в условиях комбинированных магнитных и механических воздействий была создана экспериментальная установка, схема и фотография которой представлена на рис. 1. Между полюсами электромагнита ФЛ-1 2 в область однородного магнитного поля перпендикулярно линиям магнитной индукции помещалась ячейка 1 из немагнитного и неэлектропроводного материала. Для исследования были созданы две экспериментальные ячейки. Ячейка № 1 использовалась для исследования поведения частиц магнетита и металлических шариков под воздействием магнитного поля, ячейка № 2 — для исследования динамики системы в условиях комбинированных магнитных и механических воздействий. Геометрические параметры ячеек: длина 110 мм, ширина 30 мм и высота 20 мм. Материалом для экспериментальных ячеек послужило оргстекло. Исследования проводились при комнатной температуре.

Эксперимент № 1 проводился следующим образом: ячейка № 1 заполнялась исследуемой средой, герметично закрывалась и подвергалась длительному вращению в различных направлениях для обеспечения равномерного распределения компонентов системы по всему объему дисперсной среды. После этого она помещалась в электромагнит ФЛ-1, и начинался эксперимент с увеличением напряженности магнитного поля от 0 до 1000 кА/м. После проведения эксперимента исследуемая модельная среда повторно



Рис. 1. Блок-схема и фотография экспериментальной установки: 1 — ячейка, 2 — электромагнит ФЛ-1, 3 — цифровой USB — микроскоп МИКМЕД 5.0.

перемешивалась и размагничивалась, и снова проводился эксперимент.

В эксперименте № 2 тоже осуществлялось механическое перемешивание среды. В одной из боковых частей ячейки № 2 проделано отверстие с трубочкой, в которую вставлялся поршень. При проведении эксперимента устанавливалось определенное значение напряженности магнитного поля от 0 до 1000 кА/м и возбуждались колебания в системе методом выдергивания поршня из трубочки.

В качестве модельной среды были выбраны частицы микронного размера магнетита и стальные шарики диаметром 1 мм в вязкой среде — глицерине. Для определения размеров частиц магнетита было проведено микроскопическое исследование с помощью конфокального микроскопа аппаратного комплекса OmegaScore™. Изображения частиц, полученные на конфокальном микроскопе, анализировались при помощи свободно распространенной программы Digimiser. Для этого микроскопическое изображение частиц открывалось в программе, вводилась длина реперного отрезка, определялся его размер

в пикселях, и осуществлялось измерение размера каждой из частиц. Итогом являлся файл с размерами, на основе которого строилась гистограмма распределения частиц магнетита по размерам. Нормирование размеров частиц показало, что диапазон диаметров частиц находится в пределах от 0.2 до 2 мкм. При этом образец содержит преимущественно частицы диаметром от 1 до 2 мкм.

Съемка распределения частиц в ячейке проводилась цифровым USB-микроскопом 3 МИКМЕД 5.0. Микроскоп устанавливался вертикально над ячейкой на расстоянии 20 см от нее. Основными характеристиками микроскопа являются разрешение 5 Мпикс и увеличение до 300 крат.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В эксперименте № 1 стальные шарики в глицерине были распределены в 2 вариантах: по всему объему и в одну линию.

На рис. 2 представлено образование цепочечных структур при объемном распределении шариков.

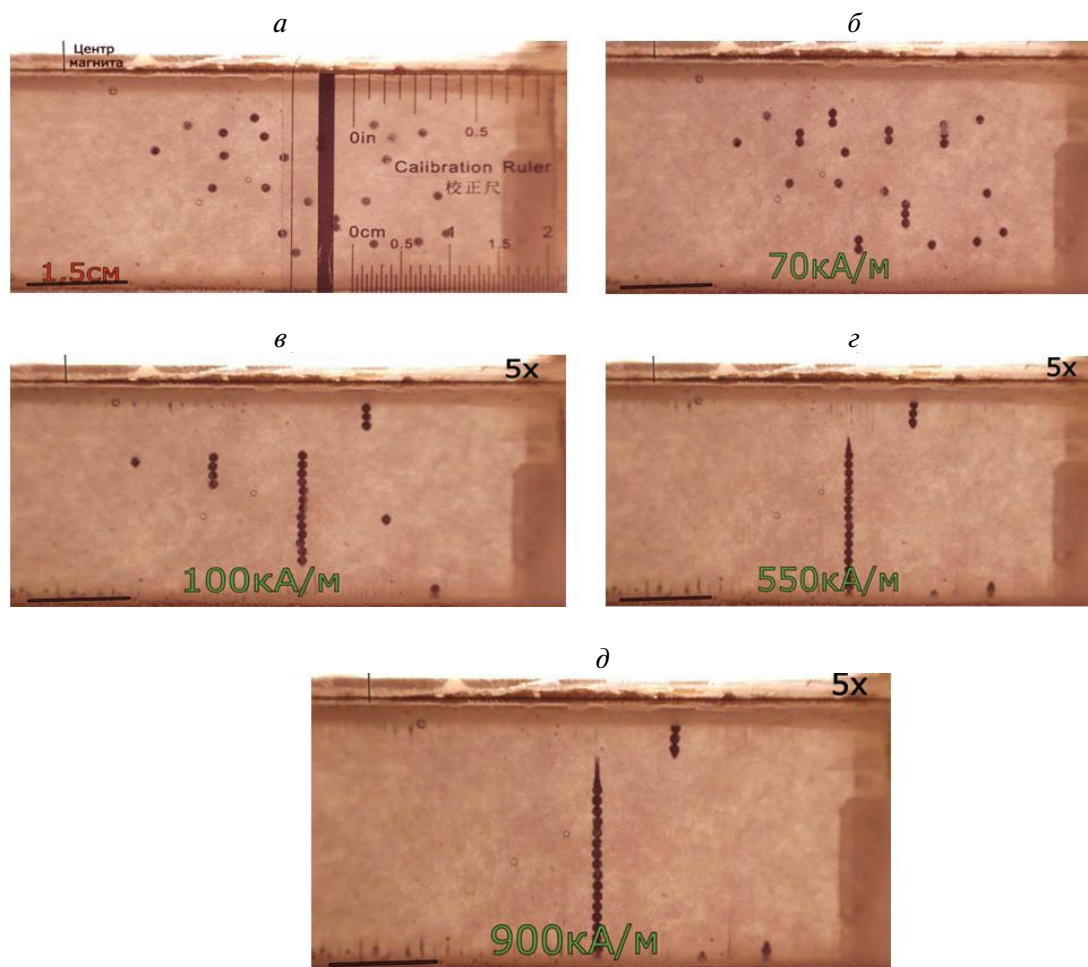


Рис. 2. Результат модельного эксперимента при объемном распределении шариков при различной напряженности магнитного поля.

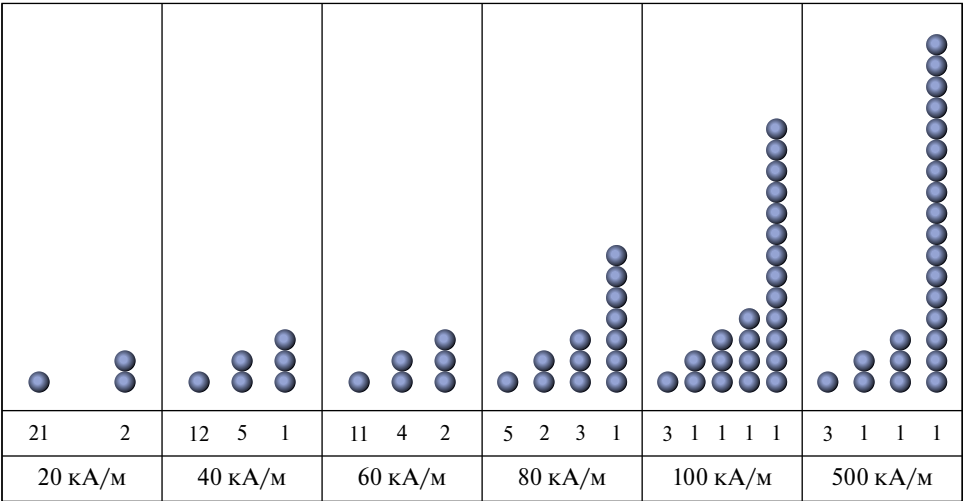


Рис. 3. Распределение шариков в цепочках при различной напряженности поля (объемное распределение).

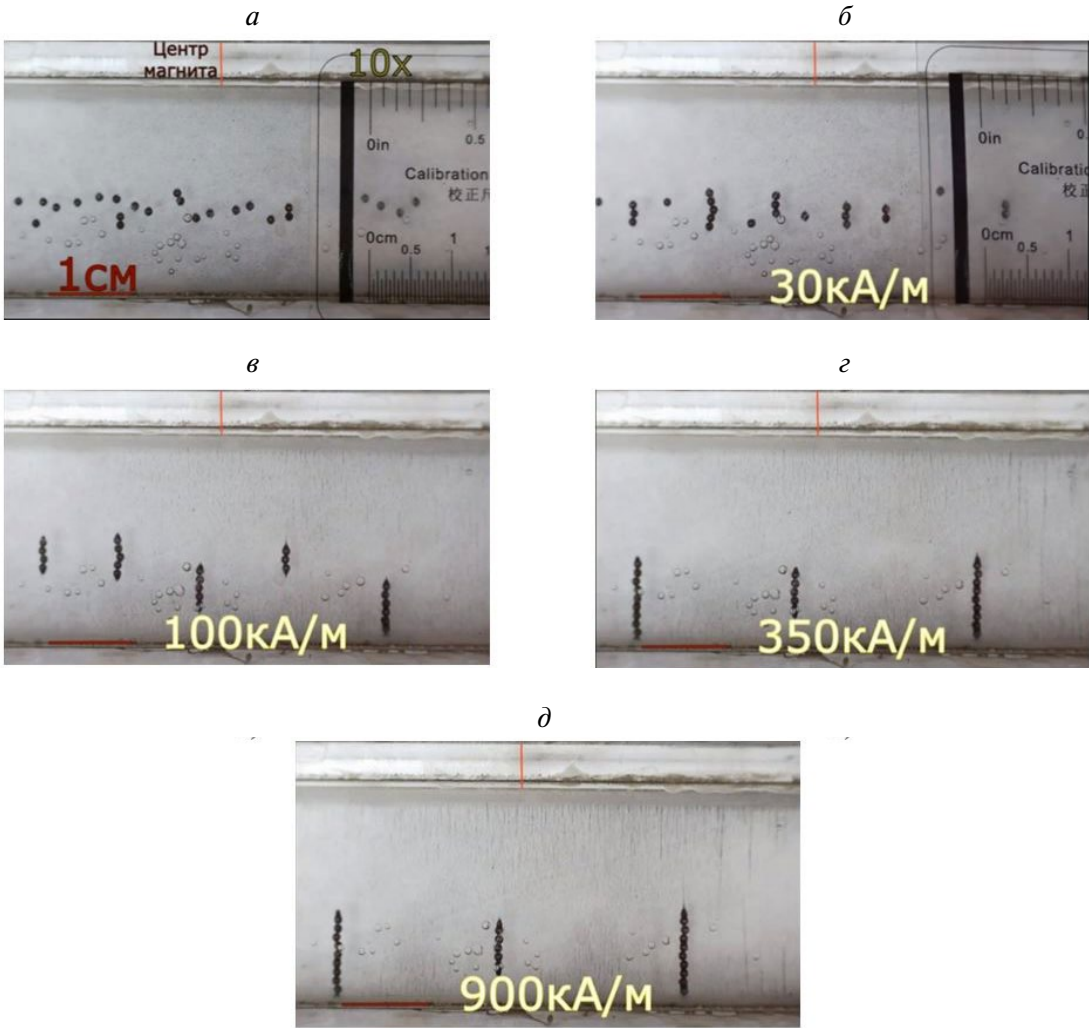


Рис. 4. Результат модельного эксперимента при линейном распределении шариков при различной напряженности магнитного поля.

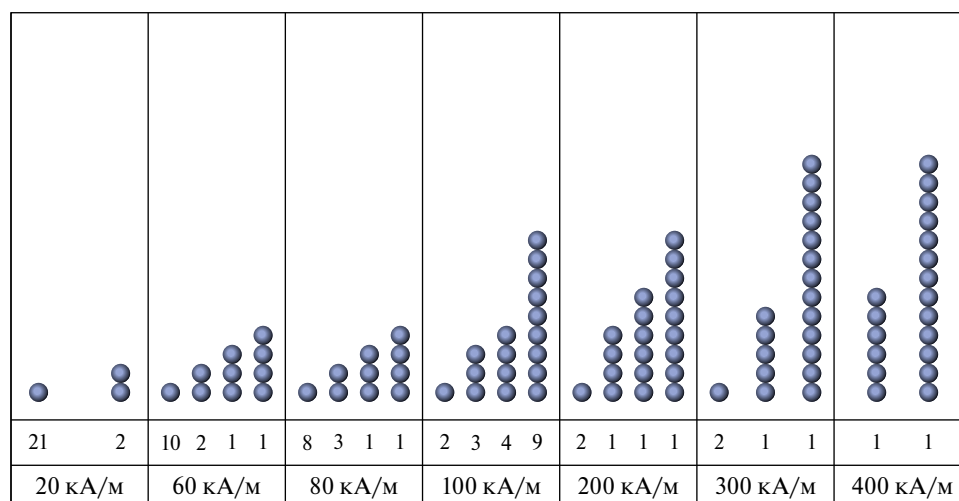


Рис. 5. Распределение шариков в цепочках при различной напряженности поля (линейное распределение).

Видно, что сначала объединяются близко расположенные шарики (рис. 2б), образуя агрегаты из двух и трех шариков. Затем они сцепляются в одну длинную цепочку (рис. 2в и 2г). При максимальном поле (рис. 2д) образовалась одна длинная цепочка и две коротких. Частицы магнетита при этом присоединились к торцам шариков. Был проведен подсчет количества шариков, объединенных в цепочки, при различной напряженности внешнего магнитного поля, а также посчитано количество таких цепочек (рис. 3). В эксперименте, представленном на рисунке 2, не происходит изменения числа цепочек в диапазоне увеличения напряженности магнитного поля от 500 до 1000 кА/м.

На рис. 4 представлено образование цепочечных структур при линейном распределении шариков. При включении магнитного поля частицы приходят в движение, начинают упорядочиваться шарики (рис. 4б), выстраиваясь в цепочки по два-три шарика. Затем (рис. 4в) выстраиваются мелкие частицы, происходит присоединение их к шарикам. На рис. 4г мелкие частицы выстроились в цепочки, мелкие цепочки из маленьких частиц объединяются в длинные, шарики образовали три цепочки — две содержат по 10 шариков и одна в центре состоит из 5 таких шариков. Рис. 4д показывает, что упорядочивание завершено. В данном эксперименте не происходит изменения числа цепочек в диапазоне увеличения напряженности магнитного поля от 400 до 1000 кА/м (рис. 5).

Таким образом, наиболее интенсивный рост длины цепочек наблюдается в магнитном поле слабой и средней напряженности. При этом размер цепочек зависит не только от напряженности внешнего поля, но и первоначального расположения шариков в момент включения магнитного поля.

Во втором эксперименте происходит возбуждение колебаний в результате механического

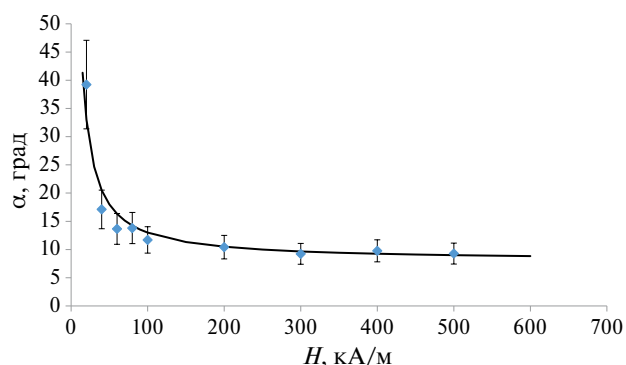


Рис. 6. Зависимость распределения углов отклонения от положения равновесия цепочек частиц при колебательном воздействии при различном значении внешнего магнитного поля.

воздействия на модельную среду в ячейке в магнитном поле. При этом каждая цепочка частиц отклоняется от своего первоначального положения. На рис. 6 представлена зависимость распределения углов отклонения от положения равновесия цепочек частиц при колебательном воздействии при различном значении внешнего магнитного поля. При низкой напряженности поля угол отклонения цепочки частиц от положения равновесия максимальный.

Данная система служит первым приближением для исследования динамики организации магнитных систем в жидких средах. Конечно, на нее накладывают ограничение седиментация, размеры ячейки и размеры частиц будут влиять на изменение параметров, но в целом она дает представление о динамике данных систем при комбинированных магнитных и механических воздействиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена модельная среда из частиц магнетита микронного размера и металлических шариков диаметром 1 мм в вязкой среде — глицерине. Рассмотрены процессы организации данной системы во внешнем магнитном поле при его увеличении. Показано, что интенсивный рост длины цепочек наблюдается в магнитном поле слабой и средней напряженности. Также рассмотрено воздействие сдвиговых колебаний на процессы формирования структуры в исследуемых системах. Полученные данные могут послужить основой для моделирования динамики подобных систем и расширения представления об их поведении и организации в магнитных полях и при механических воздействиях.

Работа выполнена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства “Приоритет-2030” (соглашения № 075-15-2021-1155 и № 075-15-2021-1213), а также в рамках реализации темы государственного задания Минобрнауки Российской Федерации (№ 0851-2020-0035).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cheng H., Yeung Y., Tong H.* // *Progr. Natur. Sci.* 2008. V. 18. No. 1. P. 91.
2. *Jeon J., Koo S.* // *J. Magn. Magn. Mater.* 2012. V. 324. No. 4. P. 424.
3. *Lopez-Lopez M.T., Kuzhir P., Zubarev A.* // *J. Non-Newton. Fluid Mech.* 2014. V. 208. P. 53.
4. *López-López M.T., De Vicente J., Bossis G. et al.* // *J. Mater. Res.* 2005. V. 20. P. 874.
5. *Thurm S., Odenbach S.* // *Phys. Fluids.* 2003. V. 15. No. 6. P. 1658.
6. *Nowak J., Borin D., Haefner S. et al.* // *J. Magn. Magn. Mater.* 2017. V. 442. P. 383.
7. *Ambacher O., Odenbach S., Stierstadt K.* // *Z. Phys. B.* 1992. V. 86. P. 29.
8. *Odenbach S., Gilly H.* // *J. Magn. Magn. Mater.* 1996. V. 152. No. 1–2. P. 123.
9. *Ряполов П.А., Соколов Е.А., Калюжная Д.А.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2023. Т. 87. № 3. С. 348; *Ryapolov P.A., Sokolov E.A., Kalyuzhnaya D.A.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Ser. Phys.* 2023. V. 87. No. 3. P. 300.
10. *Ряполов П.А., Соколов Е.А., Шельдешова Е.В. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2023. Т. 87. № 3. С. 343; *Ryapolov P.A., Sokolov E.A., Shel'deshova E.V. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Ser. Phys.* 2023. V. 87. No. 3. P. 295.
11. *Долуденко И.М., Хайретдинова Д.Р., Загорский Д.Л. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2023. Т. 87. № 3. С. 321; *Doludenko I.M., Khairatdinova D.R., Zagorcky D.L.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Ser. Phys.* 2023. V. 87. No. 3. P. 277.
12. *Белых С.С., Ерин К.В., Фурсова В.В.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2023. Т. 87. № 3. С. 333; *Belykh S.S., Yerin C.V., Fursova V.V.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Ser. Phys.* 2023. V. 87. No. 3. P. 287.
13. *Белых С.С., Ерин К.В.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2019. Т. 83. № 7. С. 962; *Belykh S.S., Yerin C.V.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Ser. Phys.* 2019. V. 83. No. 7. P. 878.
14. *Huang H., Li H., Wang W. et al.* // *Rheologica Acta.* 2022. P. 1.

Study of the dynamics of model magnetic dispersed media under magnetic influence

E. V. Bondar¹, E. V. Shel'deshova¹, I. A. Shabanova¹, P. A. Ryapolov^{1, *}

¹Southwest State University, Kursk, Russia

*e-mail: r-piter@yandex.ru

We considered a model medium of micron-sized magnetite particles and metal balls with a diameter of 1 mm in a viscous medium — glycerin. The processes of organization of this system in an external magnetic field as it increases are considered. The impact of shear vibrations on the processes of structure formation in the systems under study is also considered. The data obtained can serve as a basis for modeling the dynamics of disperse systems and expanding the understanding of their behavior and organization in magnetic fields and under mechanical influences.

Keywords: magnetorheological fluid, magnetic fluid, model medium, chain structures, magnetic field.