

УДК 537.9:532.696:544.774.4:538.955

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ С НЕМАГНИТНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

© 2024 г. Ю. И. Диканский¹, Д. В. Гладких¹, *, Д. С. Дорожко¹, А. В. Курнев¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Северо-Кавказский федеральный университет», Ставрополь, Россия

*E-mail: gladkikhdy@mail.ru

Поступила в редакцию 22.01.2024

После доработки 29.04.2024

Принята к публикации 28.06.2024

Экспериментально исследованы особенности магнитной восприимчивости магнитной жидкости с немагнитным наполнителем. Установлено, что зависимость магнитной восприимчивости от концентрации немагнитного наполнителя имеет особенности. Объяснение обнаруженных эффектов основано на предположении о влиянии поверхностных сил на процессы релаксации магнитного момента магнитных частиц. Также обнаружено, что зависимости магнитной восприимчивости магнитной жидкости с немагнитным наполнителем от величины внешнего магнитного поля отличаются от аналогичных зависимостей для магнитной жидкости без наполнителя.

Ключевые слова: магнитная жидкость, магнитная восприимчивость, пористая среда, процессы релаксации магнитного момента

DOI: 10.31857/S0367676524100016, **EDN:** DUCMKY

ВВЕДЕНИЕ

Насыщенная жидкостью пористая среда представляет собой материал, в котором жидкость заполняет поры твердой матрицы, и широко встречается как в природе (например, цитоплазма, внутренние органы тела человека и пищевые продукты), так и в технике (например, горные породы, полимеры, древесина, бетон и почва). Изучению физических свойств подобных систем посвящено очень большое количество экспериментальных и теоретических работ, например [1–5].

В технике и физико-химической технологии достаточно часто оказывается, что жидкости, которыми насыщены пористые среды, представляют собой коллоиды. Физические свойства таких систем зависят от содержания и свойств насыщающей пористые среды жидкости. Исследование происходящих в этом случае процессов осложняется необходимостью учета поверхностных эффектов, в результате чего свойства жидкости из-за взаимодействия с поверхностью пор отличаются от свойств объемной жидкости. Экспериментально было установлено, что наличие микро- и наноразмерных пор в пористой среде может приводить к значительному изменению физических свойств систем: например, изменению объема [6, 7], механической жесткости [8, 9], вязкости жидкости [10–13]. В последние годы было проведено несколько теоретических исследований для характеристики поверхностных эффектов насыщенных пористых сред, например [14–19].

Практически все проведенные экспериментальные и теоретические исследования были осуществлены для жидкостей и коллоидов со слабыми магнитными свойствами. Это привело к тому, что основное внимание исследователей сосредоточилось на механических и электрических свойствах таких систем. Однако большой интерес представляют исследования при использовании в качестве дисперсной среды магнитных коллоидов и их композитов, изучению физических свойств которых до сих пор уделяется много внимания, например [20–22]. Исследование особенностей намагничивания и процессов релаксации в таких средах является очень важным вопросом, так как эти данные необходимы для разработки конкретных приложений. Поверхностные эффекты являются одним из факторов, которые должны значительно влиять на кинетику намагничивания таких систем. Учет этого фактора становится особенно важным при намагничивании тонких слоев магнитного коллоида, ограниченного твердыми стенками или при заполнении им пористых матриц. Исследований, посвященных изучению этого вопроса, к настоящему времени проведено очень немного. Ранее [23–25] нами уже проводились исследования, посвященные изучению влияния хорошо развитой межфазной поверхности на процессы намагничивания магнитных коллоидов на основе керосина.

Данная работа является продолжением начатых ранее исследований: представлены результаты исследования зависимостей магнитной восприимчивости образца от объемного содержания немагнитного наполнителя без и при дополнительном воздействии внешнего постоянного магнитного поля.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования была использована однородная магнитная жидкость (МЖ) типа магнетит в керосине, стабилизированная олеиновой кислотой (объемная концентрация магнетита 14 %, плотность 1403 кг/м³, намагниченность насыщения 37.1 кА/м, средний размер частиц магнетита 12.6 нм). Далее в данный образец магнитной жидкости засыпался немагнитный наполнитель. В качестве немагнитного наполнителя использовался белый электрокорунд для пескоструйных аппаратов по ТУ 23.99.15-001-64290490-2017 фракции 40—50 мкм.

Измерение магнитной восприимчивости осуществлялось мостовым методом [26] на частоте 320 Гц. Измерительная установка состояла из измерительного соленоида, двухслойная обмотка которого нанесена на кварцевую трубку, длина которой в 30 раз превышает ее диаметр. Внутри измерительного соленоида соосно ему располагался кварцевый цилиндрический контейнер для образца. Кроме того, с целью исключения влияния температурных колебаний на величину индуктивности и добротности измерительного соленоида осуществлялось его термостатирование, путем прокачивания воды через охлаждающую рубашку при температуре 293 К. Измерения индуктивности и добротности соленоида проводились с помощью прецизионного моста LCR-819 с погрешностью, не превышающей 0.1 %, амплитуда измерительного поля не превышала 20 А/м. Эффективная величина действительной части магнитной восприимчивости рассчитывалась по изменению индуктивности соленоида при внесении в него образца: $\chi'_{\text{eff}} = \frac{L - L_0}{L_0}$, где L_0 и L — индуктивность соленоида при пустой и заполненной ячейках соответственно. Абсолютные значения восприимчивости χ' определялись путем учета коэффициента заполнения A измерительного соленоида ($\chi' = A\chi'_{\text{eff}}$) [26]. Его значение определяется соотношением размеров и формы образца и катушки и их взаимным расположением

$$A = \frac{\int_{V_1} H^2 dV}{\int_{V_2} H^2 dV} = 22,$$

где H — напряженность магнитного поля соленоида, V_1 — объем образца, V_2 — объем магнитного поля соленоида.

Внешнее магнитное поле создавалось кубической катушкой с пятисекционной обмоткой [27], с отношением числа витков в секциях 19:4:10:4:19. Неоднородность создаваемого намагничивающей системой поля в месте расположения витков измерительной ячейки не превышала 0.3 %.

Изменение концентрации немагнитного наполнителя в МЖ производилось путем последовательного порционного (по 0.5 см³) добавления электрокорунда в контейнер с образцом МЖ; после каждого добавления образец тщательно перемешивался для обеспечения однородности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно теории Ланжевена [28] намагниченность магнитной жидкости в области слабых полей может быть представлена в виде:

$$M = M_s \varphi_m \frac{\xi}{3} = \frac{\mu_0 m \varphi_m M_s H}{3kT}, \quad (1)$$

где M_s — намагниченность насыщения магнетита, ξ — параметр Ланжевена, φ_m — концентрация магнитной фазы, μ_0 — магнитная постоянная, H — напряженность внешнего поля, m — магнитный момент частицы, k — постоянная Больцмана, T — температура.

В этом случае для начальной магнитной восприимчивости $\chi = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{M}{H}$ имеем:

$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{\mu_0 m \varphi_m M_s}{3kT}. \quad (2)$$

Начальная концентрация магнитной фазы определяется как $\varphi_{m0} = \frac{V_m}{V}$, где V — исходный объем магнитной жидкости, V_m — объем магнитной фазы.

Добавление в магнитную жидкость немагнитного наполнителя приводит к изменению концентрации магнитной фазы. Потому $\varphi_m = \frac{V_m}{V + V_{\text{пор}}}$, где $V_{\text{пор}}$ — объем немагнитного наполнителя.

В результате для магнитной восприимчивости получается выражение:

$$\chi = \frac{\mu_0 m M_s}{3kT} \frac{\varphi_{m0} V}{V + V_{\text{пор}}} = \frac{\mu_0 m M_s \varphi_{m0}}{3kT} (1 - \delta), \quad (3)$$

где $\delta = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{пор}} + V}$ — объемная концентрация немагнитного наполнителя.

Добавление в магнитную жидкость немагнитного наполнителя при небольших концентрациях последнего подобно разбавлению жидкостью носителем (керосином). В этом случае, как следует из выражения (2), зависимость магнитной восприимчивости от концентрации магнитной фазы должна носить

линейный характер, а от объема немагнитного наполнителя — в соответствии с выражением (3).

В рамках дебаевской теории поляризации [26], при условии малых величин диссипативных потерь в исследуемой МЖ, отличие действительной части комплексной магнитной восприимчивости, измеренной в переменном поле, от магнитной восприимчивости, измеренной в постоянном поле, незначительно. Это отличие определяется множителем, зависящим от частоты переменного поля и времени релаксации магнитного момента: $\chi' = \frac{\chi_0}{1 + (\omega\tau)^2} = A_\omega \chi$.

Значение коэффициента A_ω , рассчитанное для частоты 320 Гц, с использованием оценок значений τ близко к единице. Это позволяет провести сопоставление экспериментальных результатов измерения восприимчивости магнитной жидкости при добавлении немагнитного наполнителя в теоретическими зависимостями, определяемыми выражениями (2) и (3).

Результаты проведенных экспериментальных исследований магнитной восприимчивости образца магнитной жидкости при добавлении немагнитного наполнителя представлены на рис. 1 (кривая 1) и 2 (кривая 1). Для сравнения на этих рисунках приведены теоретические зависимости восприимчивости от объемной концентрации немагнитного наполнителя δ , согласно выражению (3), (рис. 1, кривая 2) и от концентрации магнитной фазы, согласно выражению (2), (рис. 2, кривая 2). Как видно из рисунков экспериментальные результаты качественно согласуются с теоретическими зависимостями. Однако при определенном объемном содержании немагнитного наполнителя наблюдается расхождение

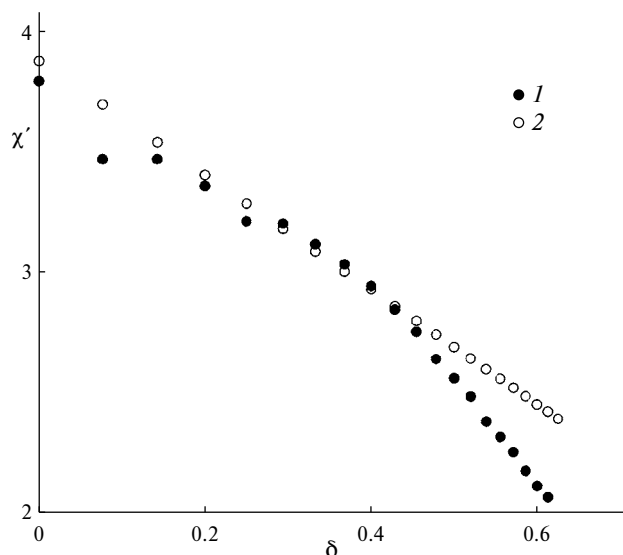


Рис. 1. Зависимость магнитной восприимчивости образца МЖ ($\varphi_{m0} = 14\%$) от объемной концентрации немагнитного наполнителя: 1 — эксперимент, 2 — теоретическая зависимость (в соответствии с формулой (3)).

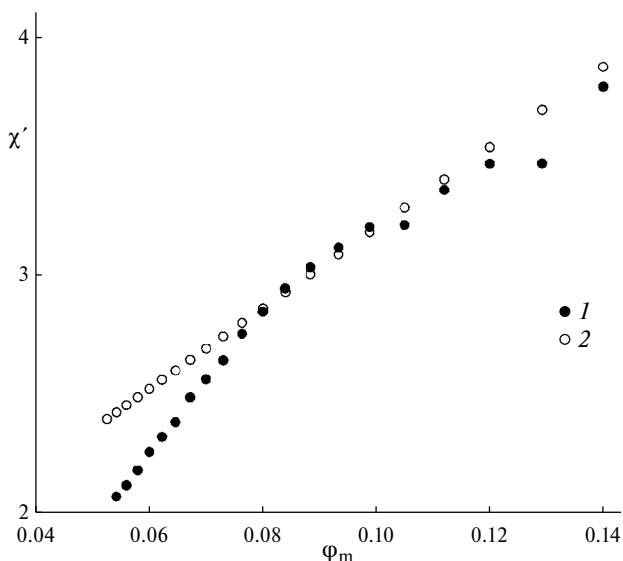


Рис. 2. Зависимость магнитной восприимчивости образца от концентрации магнитной фазы: 1 — эксперимент, 2 — теоретическая зависимость (в соответствии с формулой (2)).

экспериментальных и теоретических значений магнитной восприимчивости, которое усиливается с ростом объема добавленного наполнителя.

Хорошо известно [10, 13], что физические свойства жидкостей вблизи твердой поверхности изменяются в связи с существованием связанного состояния. При этом перестраиваются межмолекулярные связи в структуре жидкости под действием поля поверхностных сил. В результате свойства жидкости вблизи межфазной поверхности «твердое тело — жидкость» значительно отличаются от свойств жидкости в объеме. Одним из физических параметров, который изменяется в этом случае, является вязкость. Как было показано в [25], это может приводить к значительному изменению времени релаксации магнитных частиц в образце МЖ.

При последовательном увеличении объемного содержания немагнитного наполнителя, с одной стороны, площадь межфазной поверхности увеличивается, а с другой стороны, уменьшается расстояние между частицами магнетита и твердой поверхностью, и все большее количество магнитных частиц оказывается подвержено действию поверхностных сил. В результате их время релаксации увеличивается, что должно приводить к уменьшению магнитной восприимчивости. При малых объемных концентрациях немагнитного наполнителя эти эффекты практически не оказывают влияния на величину магнитной восприимчивости. Однако, начиная с определенного значения объемной концентрации наполнителя ($\delta \sim 0.5$), они становятся существенными и определяют уменьшение восприимчивости.

Также были проведены исследования зависимости магнитной восприимчивости магнитной жидкости с различным объемным содержанием немагнитного наполнителя от величины дополнительно приложенного внешнего постоянного магнитного поля, направленного вдоль контейнера с образцом и сонаправленного с измерительным полем. Как оказалось, для однородной магнитной жидкости зависимость $\chi'_{\text{eff}}(H)$ носила монотонно убывающий характер (рис. 3, кривая 1). При последовательном увеличении объемного содержания немагнитного наполнителя на данной зависимости появлялся максимум, положение которого практически не зависело от величины напряженности магнитного поля (рис. 3, кривые 2—4). Также было обнаружено, что увеличение объемной концентрации наполнителя приводит к уменьшению относительной величины максимума на зависимости восприимчивости от напряженности магнитного поля. Когда объемная концентрация немагнитного наполнителя превышала определенное значение ($\delta > 0.5$) максимум на зависимости $\chi'_{\text{eff}}(H)$ исчезал, и она снова становилась монотонно убывающей (рис. 3, кривые 5 и 6).

Появление максимума на зависимости $\chi'_{\text{eff}}(H)$ и его последующее исчезновение при последовательном

увеличении объемного содержания немагнитного наполнителя можно объяснить следующим образом. Поскольку размеры микрочастиц электрокорунда значительно превосходят размеры магнитных частиц магнитной жидкости, то магнитная жидкость может рассматриваться как сплошная намагничивающаяся среда, а помещаемые в нее частицы электрокорунда в магнитном поле ведут себя как магнитные дырки. При воздействии внешнего магнитного поля микрочастицы электрокорунда, приобретали магнитный момент, направленный противоположно приложенному магнитному полю. Благодаря этому при небольших концентрациях частиц электрокорунда происходило их объединение в цепочечные структуры, выстроенные вдоль магнитного поля. В результате размагничивающий фактор исследуемого образца в направлении измерительного поля уменьшался, что приводило к увеличению магнитной восприимчивости (рис. 3, кривые 2—4). При больших концентрациях микрочастиц электрокорунда последние из-за своего количества уже не могли формировать протяженные структуры в направлении магнитного поля. В результате магнитная восприимчивость образца снова становилась монотонно убывающей при увеличении напряженности внешнего магнитного поля (рис. 3, кривые 5 и 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования показали, что магнитная восприимчивость магнитной жидкости с немагнитным наполнителем существенно зависит от объемного содержания наполнителя. Начиная с определенного значения объемной концентрации наполнителя, необходимо учитывать влияние на процессы релаксации магнитного момента частиц магнетита в магнитной жидкости поверхностных сил, действие которых приводит к более значительному изменению магнитной восприимчивости. Кроме того, было установлено, что отличие зависимостей магнитной восприимчивости от напряженности внешнего магнитного поля для однородной магнитной жидкости и с наполнителем также определяется объемной концентрацией немагнитного наполнителя.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FSRN-2023-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Darcy H.* Les Fontaines Publiques De La Ville De Dijon (The Public Fountains of the City of Dijon). Paris: Dalmont, 1856.
2. *von Terzaghi K.* // Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien Math.-Naturwiss. 1923. V. 132. P. 125.
3. *Biot M.A.* // J. Appl. Phys. 1941. V. 12. P. 155.
4. *Nedjar B.* // J. Mech. Phys. Solids. 2013. V. 61. P. 537.

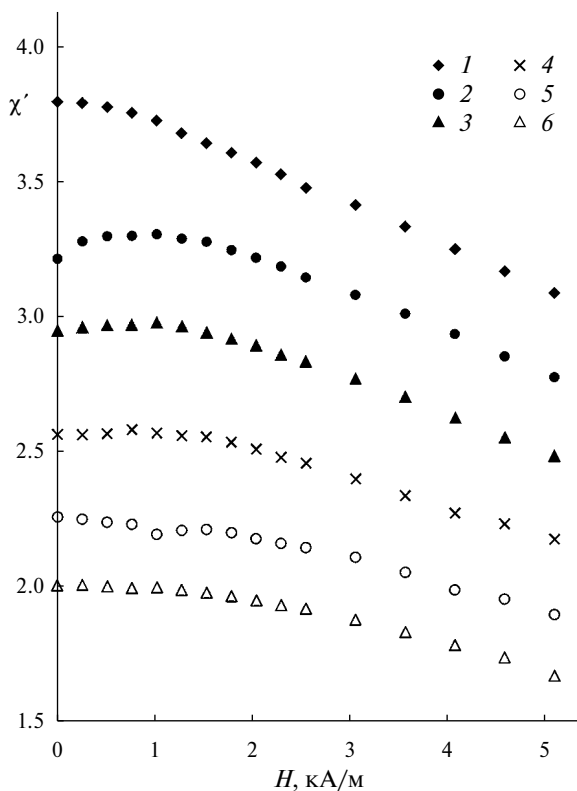


Рис. 3. Зависимость магнитной восприимчивости МЖ от напряженности внешнего поля при различной объемной концентрации немагнитного наполнителя: 1 — $\delta = 0$ (МЖ без наполнителя), 2 — $\delta = 0.25$, 3 — $\delta = 0.4$, 4 — $\delta = 0.5$, 5 — $\delta = 0.57$, 6 — $\delta = 0.625$.

5. Cheng A.H.-D. Poroelectricity. Springer, 2016. 878 p.
6. Cui X., Bustin R.M. // AAPG Bull. 2005. V. 89. P. 1181.
7. Espinoza D.N., Vandamme M., Pereira J.-M. et al. // Int. J. Coal Geol. 2014. V. 134. P. 80.
8. Ducloué L., Pitois O., Goyon J. et al. // Soft Matter. 2014. V. 10. P. 5093.
9. Style R.W., Boltyanskiy R., Allen B. et al. // Nature Phys. 2014. V. 11. P. 82.
10. Derjaguin B.V., Churaev N.V., Muller V.M. Surface forces. NY.: Plenum Press, 1987.
11. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Овчаренко Ф.Д. и др. Вода в дисперсных системах. М.: Химия, 1989. 288 с.
12. Муллер В.М., Сергеева И.П., Соболев В.Д., Чураев Н.В. // Коллоид. журн. 1986. Т. 48. № 4. С. 718.
13. Zhengming Yang. // Geofluids. 2018. V. 2018. Art. ID9542152.
14. Style R.W., Wettlaufer, J.S., Dufresne E.R. // Soft Matter. 2015. V. 11. P. 672.
15. Mancarella F., Style R.W., Wettlaufer J.S. // Soft Matter. 2016. V. 12. P. 2744.
16. Cai S., Suo Z. // J. Mech. Phys. Solids. 2011. V. 59. P. 2259.
17. Hong W., Zhao X., Zhou J., Suo Z. // J. Mech. Phys. Solids. 2008. V. 56. P. 1779.
18. Xin Chen, Fei Ti, Moxiao Li et al. // J. Mech. Phys. Solids. 2021. V. 151. Art. No. 104392.
19. Аграфонов Ю.В., Петрушин И.С., Халаимов Д.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 7. С. 985; Agrafov Yu.V., Petrushin I.S., Khalaimov D.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 7. P. 820.
20. Гареев К.Г., Непомнящая Э.К. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 7. С. 990; Gareev K.G., Nepomnyashchaya E.K. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 7. P. 904.
21. 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. Phys. 2023. V. 87. No. 3. P. 295.
22. Бельх 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. Phys. 2019. V. 83. No 7. P. 878.
23. Dikansky Yu.I., Gladkikh D.V., Shevchenko A.Yu., Sidelnikov A.A. // Magnetohydrodynamics. 2014. V. 50. No.1. P. 27.
24. Gladkikh D.V., Dikansky Yu.I., Ispiryan A.G. // Magnetohydrodynamics. 2018. V. 54. No. 1—2. P. 15.
25. Gladkikh D.V., Dikansky Yu.I. // Current Appl. Phys. 2019. V. 19. P. 1436.
26. Майоров М.М. // Магнит. гидродинамика. 1979. № 2. С. 21.
27. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. М., Л.: Госэнергоиздат, 1962. 544 с.
28. Шлиомис М.И. // УФН. 1974. Т. 112. № 3. С. 427.

Features of magnetic susceptibility of a ferrofluid with a non-magnetic filler

Yu. I. Dikansky¹, D. V. Gladkikh^{1, *}, D. S. Dorozhko¹, A. V. Kurnev¹

¹North-Caucasus Federal University, Stavropol 355017, Russia

*e-mail: dgladkikh@ncfu.ru

We presented the results of an experimental study of the features of the magnetic susceptibility of a magnetic fluid with a non-magnetic filler. It is established that the dependence of magnetic susceptibility on the concentration of non-magnetic filler has features. The explanation of the detected effects is based on the assumption of the influence of surface forces on the relaxation processes of the magnetic moment of magnetic particles. It was also found that the dependences of the magnetic susceptibility of a magnetic fluid with a non-magnetic filler on the magnitude of the external magnetic field differ from similar dependences for a magnetic fluid without a filler.

Keywords: magnetic fluid, magnetic susceptibility, porous medium, magnetic moment relaxation processes.