

Оригинальная статья / Original article

УДК 537.84

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-92-102>

Дипольное взаимодействие частиц в магнитной жидкости, стабилизированной двойным слоем ПАВ в воде

А.В. Лебедев¹✉

¹ Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук ул. Акад. Королёва, д. 1, г. Пермь 614013, Российская Федерация

✉ e-mail: lav@icmm.ru

Резюме

Цель работы: изучить влияние межчастичных диполь-дипольных взаимодействий на восприимчивость магнитной жидкости, стабилизированной двойным слоем ПАВ в воде.

Метод исследования состоит в измерении начальной дифференциальной восприимчивости магнитной жидкости в зависимости от ее концентрации. Было исследовано три образца жидкости на основе частиц магнетита, отличающихся составом стабилизирующих оболочек. В качестве стабилизатора для первого слоя использовались кислоты: лауриновая (С12), декановая (С10) и октановая (С8). Второй слой стабилизирующей оболочки образовывал додецил сульфат натрия с небольшой долей соответствующей кислоты. Измерения восприимчивости выполнялись на установке для измерения кривых намагничивания. Концентрация образцов определялась по их намагнченности насыщения.

Результаты. Измерены концентрационные зависимости начальной восприимчивости у трех образцов магнитной жидкости на основе частиц магнетита. Произведено сравнение полученных результатов с теорией модифицированного эффективного поля А.О. Иванова и среднесферической моделью. Обе теории предсказывают завышенные величины восприимчивости по отношению к экспериментальным значениям. Теория модифицированного эффективного поля завышает результаты на 20%, среднесферическая модель – на 12%. Показано, что корректная интерпретация концентрационной зависимости восприимчивости образцов магнитных жидкостей возможна только путем аппроксимации отношения восприимчивости к намагнченности насыщения. На основе этой аппроксимации для описания концентрационной зависимости восприимчивости предложена эмпирическая формула в виде полинома третьей степени с отрицательным кубическим слагаемым.

Вывод. Таким образом, полученные результаты требуют построения новой или модификации старых теорий диполь-дипольного взаимодействия частиц магнетита в водных коллоидных растворах со стабилизацией частиц двойным слоем поверхностно-активного вещества.

Ключевые слова: магнитная жидкость; восприимчивость; диполь-дипольное взаимодействие; двойной слой; вода.

Финансирование: Работа была выполнена за счет бюджетных средств Института механики сплошных сред УрО РАН в рамках бюджетной темы № AAAA-A20-120020690030-5.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Лебедев А.В. Дипольное взаимодействие частиц в магнитной жидкости, стабилизированной двойным слоем ПАВ в воде // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 4. С. 92–102. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-92-102>

Поступила в редакцию 30.09.2024

Подписана в печать 05.11.2024

Опубликована 13.12.2024

Dipole interaction of particles in magnetic fluid stabilized by a double layer of surfactant in water

Aleksandr V. Lebedev ^{1✉}

¹Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
the affiliate of the Perm Federal Scientific Research Center
1 Academician Korolev Str., Perm 614018, Russian Federation

✉ e-mail: lav@icmm.ru

Abstract

Purpose of the work: to study the influence of interparticle dipole-dipole interactions on the susceptibility of a magnetic fluid stabilized by a double layer of surfactant in water.

Research method consists in measuring the initial differential susceptibility of a magnetic fluid depending on its concentration. Three samples of fluid based on magnetite particles, differing in the composition of the stabilizing shells, were studied. The following acids were used as the first layer of the stabilizer: lauric (C12), decanoic (C10) and octanoic (C8). The second layer of the stabilizing shell was formed by sodium dodecyl sulfate with a small proportion of the corresponding acid. Susceptibility measurements were performed on a setup for measuring magnetization curves. The concentration of the samples was determined by their saturation magnetization.

Results. The concentration dependences of the initial susceptibility were measured for three samples of magnetic fluid based on magnetite particles. The obtained results were compared with theoretical models of the modified effective field of A.O. Ivanov and the average-spherical one. Both theories predict overestimated values of susceptibility in relation to experimental values. The modified effective field theory overestimates the results by 20%. The mean-spherical model - by 12%. It is shown that the correct interpretation of the concentration dependence of the susceptibility of magnetic fluid samples is possible only by approximating the ratio of susceptibility to saturation magnetization. Based on this approximation, an empirical formula in the form of a third-degree polynomial with a negative cubic term is proposed to describe the concentration dependence of susceptibility.

Conclusion. Thus, the obtained results require the construction of new or modification of old theories of dipole-dipole interaction of magnetic particles in aqueous colloidal solutions with stabilization of particles by a double layer of surfactant.

Keywords: magnetic fluid; susceptibility; dipole-dipole interaction; double surfactant layer; water.

Funding: This work was supported by the budgetary funds of the Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, within the framework of state budgetary problem no. AAAA-A20-120020690030-5.

Conflict of interest: The author declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Lebedev A.V. Dipole interaction of particles in magnetic fluid stabilized by a double layer of surfactant in water. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2024;14(4):92–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-92-102>

Received 30.09.2024

Accepted 05.11.2024

Published 13.12.2024

Введение

В начале шестидесятых годов прошлого века для решения технических задач были синтезированы коллоидные растворы мелкодисперсных магнетиков, за которыми в дальнейшем закрепилось

название «магнитные жидкости» [1]. Устоявшееся таким образом наименование нового физического объекта кратко и емко выражает его основные признаки: текучесть, характерную для обычных жидкостей, и сильные магнитные свойства, характерные для ферромагнетиков. Таким

образом, был получен новый объект для научных исследований, которые постепенно оформились в новое научное направление – феррогидродинамика [2], объединяющее в себе магнетизм и механику жидкостей.

Основной параметр, характеризующий магнитные свойства магнитной жидкости – это ее восприимчивость. Величина восприимчивости зависит от многих параметров, таких как материал и размеры дисперсных магнитных частиц, концентрация частиц, температура жидкости. Помимо указанных факторов на величину восприимчивости магнитной жидкости существенное влияние оказывают межчастичные диполь-дипольные взаимодействия. Взаимодействуя друг с другом, магнитные моменты частиц приобретают дополнительную ориентацию вдоль приложенного магнитного поля и тем самым увеличивают значение намагниченности и, соответственно, восприимчивости магнитной жидкости. Целью предлагаемой работы является исследование межчастичных взаимодействий в магнитной жидкости, стабилизированной двойным слоем ПАВ в воде.

Материалы и методы

В нашей последней работе [3] при исследовании реологии магнитных жидкостей, стабилизованных двойным слоем ПАВ в воде, было установлено противоречие между степенью разведения жидкости и уменьшением ее магнитной восприимчивости [4], а именно восприимчивость убывала с уменьшением концентрации медленнее, чем это предсказывала теория модифицированного эффективного поля [5]. Обнаруженное противоречие выглядело очень странным на фоне большого количества экспериментальных работ [6], в которых было установлено полное согласие температурных [7] и концентрационных [8] зависимостей восприимчивости с теорией эффективного поля [9]. По-

видимому, стабилизация магнитных частиц в воде двойным слоем ПАВ как-то качественно изменяет взаимодействие частиц.

Для выяснения этого вопроса были выполнены дополнительные эксперименты по измерению концентрационных зависимостей восприимчивости у серии образцов магнитных жидкостей с разными типами стабилизаторов. Наряду с уже имеющимся образцом жидкости, стабилизированным комбинацией ПАВ лауриновая кислота – додецил сульфат натрия, было синтезировано еще два образца с использованием для первого слоя ПАВ декановой и октановой кислот. Для второго слоя стабилизатора также использовался додецил сульфат натрия. У всех трех образцов измерялась их восприимчивость при пяти различных концентрациях. Концентрация определялась по намагниченности насыщения. В отличие от [3] в настоящей работе используется другой, более корректный метод интерпретации полученных результатов. Полиномом аппроксимируется не зависимость восприимчивости от концентрации, а зависимость отношения восприимчивости к намагниченности насыщения.

В опытах измерялась восприимчивость трех образцов магнитных жидкостей на основе частиц магнетита, стабилизованных в воде двойным слоем ПАВ. Магнетит был выбран в качестве материала частиц по причине простоты синтеза путем химического соосаждения [10]. Технология химического соосаждения частиц магнетита была оптимизирована применительно к магнитным жидкостям в работах [11]. Процесс стабилизации магнитных жидкостей двойным слоем ПАВ хорошо известен [12] и неоднократно описан в литературе [13].

На первом этапе производится синтез частиц магнетита путем химического соосаждения [14]. К раствору солей двух- и трехвалентного железа доливается в избытке аммиачная вода. При этом на дно

выпадают частицы магнетита в виде черного осадка. На втором шаге частицы покрывают первым, внутренним слоем ПАВ. Выбранную жирную кислоту берут в количестве 0,35 моля на 1 моль магнетита и добавляют в раствор. Оставшийся избыток аммиака облегчает прикрепление молекул кислоты на поверхности частиц. В результате на дне собирается густой, нерастворимый в воде осадок. Последняя, третья операция состоит в получении внешнего, гидрофильного покрытия частиц. Для всех трех образцов в данном случае мы использовали додецил сульфат натрия. При его добавлении в раствор и последующем нагреве частицы из осадка

на дне переходят в раствор, образуя магнитную жидкость.

В результате было синтезировано три образца магнитной жидкости на основе воды, обладающих достаточно сильными магнитными свойствами. Это объясняется использованием для стабилизации частиц молекул ПАВ значительно меньшей длины по сравнению с олеиновой кислотой. В таблице 1 представлены основные параметры синтезированных образцов: статическая начальная восприимчивость χ_0 при комнатной температуре, намагниченность насыщения M_s , динамическая вязкость η .

Таблица 1. Основные параметры образцов магнитной жидкости

Table 1. The main parameters of magnetic fluid samples

ПАВ	χ_0	M_s , кА/м	η , сПз
Лауриновая/ДДС	4,799	28,70	9,35
Декановая/ДДС	4,116	26,18	6,64
Октановая/ДДС	5,285	33,03	7,19

Измерение магнитных параметров образцов производилось на установке для измерения кривых намагничивания методом дифференциальной прогонки. Основным измеряемым параметром в этом методе является дифференциальная восприимчивость в зависимости от приложенного внешнего постоянного поля. Кривая намагничивания затем восстанавливается путем численного интегрирования полученной зависимости.

Метод измерения восприимчивости аналогичен измерению динамической восприимчивости [15] и основан на измерении напряжения, индуцируемого в измерительной катушке перемагничиваемым образцом. Образец магнитной жидкости заливался внутрь тонкостенной латунной пробирки диаметром 5 мм и длиной 100 мм. Поверх пробирки была намотана измерительная катушка проводом диаметром 0,1 мм. Число витков в катушке 2000.

Рядом с измерительной катушкой располагалась идентичная пробирка с компенсационной катушкой. Катушки соединялись встречно-последовательно. Число витков в компенсационной катушке корректировалось, чтобы в отсутствие образца жидкости сигналы катушек компенсировались. Изготовленная таким образом измерительная ячейка помещалась внутрь мощного соленоида с жидкостным охлаждением.

Магнитное поле имело две составляющие: постоянное намагничающее поле и низкочастотное зондирующее. Постоянная компонента магнитного поля, создаваемая стабилизованным источником постоянного тока, изменялась в диапазоне от 0 до 270 кА/м. Для создания зондирующего поля поверх основной обмотки соленоида была намотана дополнительная однослойная обмотка, которая питалась от усилителя постоянного тока. Частота зондирующего поля менялась от 1

до 12 Гц в зависимости от свойств образца и условий измерений. Амплитуда зондирующего поля равнялась 200 А/м в слабых подмагничивающих полях. В сильных полях, когда величина разностного сигнала с катушек становилась недостаточной для регистрации, амплитуда зондирующего поля увеличивалась до 2 кА/м.

Измерение сигналов с катушек производилось с помощью 24-разрядного четырехканального цифроаналогового преобразователя. Использование многоканального АЦП позволяет одновременно регистрировать сигналы с катушек: разностный, который пропорционален намагниченности образца жидкости, и сигнал с компенсационной катушкой, который пропорционален амплитуде зондирующего поля. Третий канал АЦП используется для измерения величины постоянного магнитного поля путем регистрации сигнала с токового шунта в намагничивающей обмотке соленоида.

Величина восприимчивости образца магнитной жидкости находилась из отношения сигналов, индуцируемых в измерительной ΔU и компенсационной U_{comp} катушках:

$$\chi = \sigma \frac{\Delta U}{U_{\text{comp}}},$$

где σ – отношение средней площади витка компенсационной катушки к площади поперечного сечения образца жидкости. Подробно конструкция установки для измерения кривых намагничивания описана в работе [16]. Методика обработки кривых намагничиваниям (в частности, определение намагниченности насыщения) приведена в работе [17].

В работе [16] также были выполнены опыты по проверке корректности измерений кривых намагничивания путем сравнения с измерениями намагниченности отверженных образцов магнитной жидкости на вибрационном магнитометре.

Наблюдалось полное согласие результатов измерений. Таким образом, относительная погрешность измерения намагниченности и величины магнитного поля оценивается на уровне 0,2%.

Результаты и их обсуждение

Как уже было указано выше, концентрационная зависимость восприимчивости жидкости со стабилизацией частиц двойным слоем ПАВ в воде не соответствует теории модифицированного эффективного поля [4]. Согласно этой теории за счет межчастичных взаимодействий восприимчивость магнитной жидкости χ , измеряемая в экспериментах, превышает восприимчивость ансамбля невзаимодействующих магнитных частиц [5]. Последнюю традиционно называют восприимчивостью Ланжевена χ_L , поскольку она равняется суперпозиции намагниченностей отдельных частиц, описываемых с помощью функции Ланжевена. Согласно [5] χ и χ_L связаны между собой полиномом третьей степени:

$$\chi = \chi_L + \frac{\chi_L^2}{3} + \frac{\chi_L^3}{144} + \dots, \quad \chi_L = \mu_0 \frac{n < m^2 >}{3kT},$$

где n – числовая концентрация магнитных частиц; $<m^2>$ – средний квадрат магнитного момента частиц; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Как было отмечено нами в [3], значения восприимчивости Ланжевена, вычисленные для различных концентраций жидкости, не укладывались на прямую линию в зависимости от намагниченности насыщения образцов. Другими словами, теория эффективного поля Иванова предсказывает сильно завышенные значения восприимчивости. Подобное противоречие наблюдается также и со среднесферической моделью Верхейма [18]. В данном случае расхождение меньше, но оно все равно является существенным.

Что касается хорошо известных классических теорий Дебая – Онзагера и Лоренца [19], то первая дает результаты расчетов, заниженные на 22%, а вторая предсказывает переход в ферромагнитное состояние. Непригодность классических теорий для описания межчастичных взаимодействий в магнитных жидкостях была показана нами в одной из самых ранних работ [20].

На рисунке 1 в качестве примера представлена восприимчивость жидкости со стабилизацией двойным слоем октановая кислота – додецил сульфат натрия в зависимости от ее намагниченности насыщения. Из рисунка хорошо видно, что зависимости, рассчитанные по теории эффективного поля и среднесферической

модели, проходят значительно выше экспериментальных точек. Расхождение достигает 20% для первой модели и 12% для второй. На жидкостях, стабилизованных лауриновой и декановой кислотами, были получены экспериментальные результаты, полностью аналогичные приведенным. Для жидкости со стабилизацией парой ПАВ лауриновая – додецил сульфат натрия расхождение составило соответственно 19% и 12%. Для жидкости с ПАВ декановая – додецил сульфат натрия – 17% и 12%. Очевидно, что для жидкости, стабилизированной двойным слоем ПАВ в воде, обе модели – среднесферическая и модифицированного эффективного поля – совершенно не пригодны.

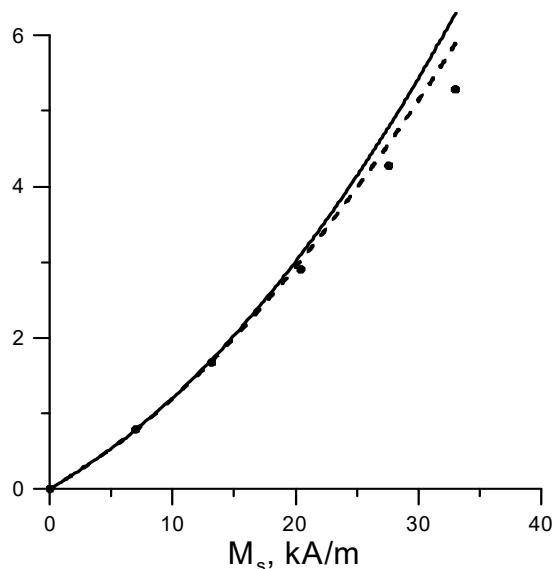


Рис. 1. Начальная восприимчивость магнитной жидкости, стабилизированной в воде двойным слоем октановая кислота – додецил сульфат натрия в зависимости от ее намагниченности насыщения. Сплошная линия – расчет по модифицированной теории эффективного поля, пунктирная – среднесферическая модель, точки – эксперимент

Fig. 1. Initial susceptibility of magnetic fluid stabilized in water by a double layer of octanoic acid – sodium dodecyl sulfate depending on its saturation magnetization. Solid line – calculation according to the modified effective field theory, dotted line – mean spherical model, points – experiment

Указанные расхождения между расчетными и измеренными значениями восприимчивости почти на два порядка превышают погрешность измерений восприимчивости и намагниченности магнитной жидкости (0,2%). Так называемые планки погрешности (errorbars) на рисунке 1 не

представлены в силу своей малости – они значительно меньше символов, отражающих экспериментальные результаты.

В [3] была сделана попытка описать полученные экспериментальные результаты, аппроксимируя кривую зависимости восприимчивости от намагниченности

насыщения параболой, подбирая коэффициент при квадратичном слагаемом. Полученные значения коэффициентов сильно различались от одного образца жидкости к другому и были далеки от теоретического значения $1/3$. Последнее обстоятельство вызывает наибольшие сомнения в правильности выбранного подхода. Практически все теории, описывающие влияние диполь-дипольных взаимодействий на восприимчивость, как модели Онзагера, Лоренца, среднесферическая, так и модель эффективного поля, имеют в своем разложении в ряд по восприимчивости Ланжевена квадратичный член с коэффициентом $1/3$. Величина коэффициента органично возникает из теоретических построений при рассмотрении ближайшего окружения выделенной частицы в виде сферы. Поэтому аппроксимация экспериментальных результатов квадратичной зависимостью некорректна.

Формально можно полученные результаты попытаться аппроксимировать кубической зависимостью. Однако аппроксимирующие кривые в этом случае практически неотличимы от параболы. Еще одним фактором является сильная зависимость восприимчивости от концентрации жидкости. В случае аппроксимации величины, сильно меняющейся по величине, аппроксимация в точках с малым значением восприимчивости происходит с большой относительной погрешностью. По указанным причинам правильнее будет аппроксимировать слабо меняющуюся величину – отношение восприимчивости к намагниченности насыщения.

На рисунке 2 представлено отношение начальной восприимчивости к намагниченности насыщения жидкости в зависимости от ее намагниченности насыщения.

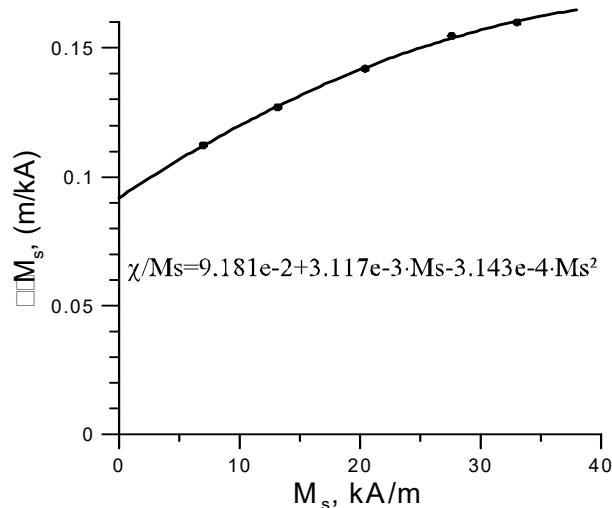


Рис. 2. Отношение начальной восприимчивости к намагниченности насыщения жидкости, стабилизированной парой ПАВ октановая кислота – додецил сульфат натрия в зависимости от намагниченности насыщения

Fig. 1. Ratio of initial susceptibility to saturation magnetization of liquid stabilized by surfactant pair octanoic acid – sodium dodecyl sulfate as a function of saturation magnetization

Очевидно, что приведенная на рисунке зависимость должна аппроксимироваться параболой. Под кривой на рисунке 2 приведено аппроксимирующее выражение. Тогда зависимость восприимчивости

магнитной жидкости от ее концентрации в случае стабилизации магнитных частиц в воде двойным слоем ПАВ должна описываться кубическим полиномом. В нашем

случае для жидкости с октановой кислотой в первом слое стабилизатора полином имеет следующий вид:

$$\chi = \chi_L + 0,3698\chi_L^2 - 0,04061\chi_L^3.$$

Экспериментальные результаты описываются им с относительной погрешностью на уровне 0,2%, что соответствует погрешности измерений.

Первое, что хочется отметить, коэффициент при кубическом слагаемом в полученном разложении имеет отрицательный знак. В этом экспериментальные результаты качественно противоречат

обеим теоретическим моделям, в которых кубические слагаемые положительны. Второе – это величина коэффициента. Она также существенно отличается от теоретической. Аналогичные результаты были получены и для двух других образцов магнитных жидкостей – с лауриновой и декановой кислотами.

В таблице 2 представлены коэффициенты кубических полиномов, аппроксимирующих концентрационные зависимости восприимчивости образцов магнитных жидкостей.

Таблица 2. Коэффициенты кубических полиномов, аппроксимирующих концентрационную зависимость восприимчивости образцов магнитной жидкости

Table 2. Coefficients of cubic polynomials approximating the concentration dependence of the susceptibility of magnetic fluid samples

ПАВ	K ₂	K ₃	K ₃ modified
Лауриновая/ДДС	0,3449	-0,03623	-0,0344
Декановая/ДДС	0,3504	-0,04254	-0,0361
Октановая/ДДС	0,3698	-0,04061	-0,0320

Сразу бросается в глаза то, что коэффициент квадратичного члена ряда имеет величину, близкую к теоретическому значению 1/3. Возникает сильное желание положить его значение точно равным теоретическому и посмотреть, как это повлияет на кубический коэффициент. В принципе он также должен немного уменьшиться.

В правом столбце таблицы 2 представлены видоизмененные значения кубического коэффициента, определенные из условия наилучшего согласования результатов расчетов с экспериментом. Все три полученных значения близки между собой, а их среднее значение равно -0,034. Полученная величина близка к целой дроби -1/30, что по модулю равно на порядок меньше квадратичного коэффициента.

Таким образом, влияние межчастичных диполь-дипольных взаимодействий

на начальную восприимчивость магнитных жидкостей, стабилизованных двойным слоем ПАВ в воде, может быть описано следующим эмпирическим выражением:

$$\chi = \chi_L + \frac{\chi_L^2}{3} - \frac{\chi_L^3}{30} \dots$$

Остается только найти этому выражению какое-либо теоретическое объяснение. Одной из гипотез может служить предположение о меньшей степени агрегирования частиц в водных жидкостях из-за сильного электростатического отталкивания внешних ионизированных слоев ПАВ. По причине этого отталкивания частицы остаются равномерно распределенными в жидкости, что должно снижать величину восприимчивости.

Выводы

Выполнены измерения концентрационной зависимости начальной восприимчивости у трех образцов магнитной жидкости на основе частиц магнетита, стабилизованных в воде двойным слоем ПАВ. Для стабилизации жидкостей использовались пары ПАВ: лауриновая кислота – ДДС, декановая кислота – ДДС, октановая кислота – ДДС.

Обнаружено, что теория модифицированного эффективного поля и среднесферическая модель предсказывают завышенные значения восприимчивости. Рас-

хождение достигает 20% в первом случае и около 12% во втором для концентрированных образцов, что намного превышает погрешность измерений.

Показано, что для аппроксимации концентрационной зависимости начальной восприимчивости необходимо использовать кубический полином. Определены коэффициенты полинома. Квадратичный коэффициент практически совпал с теоретическим значением 1/3. Величина кубического коэффициента оказалась близкой к -1/30.

Список литературы

1. Шлиомис М.И. Магнитные жидкости // Успехи физических наук. 1974. Т. 112, вып. 3. С. 435–458. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0112.197403b.0427>
2. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика / пер. с англ. под ред. В.В. Гогосова. М.: Изд-во Мир, 1989. 356 с.
3. Lebedev A.V. Magnetic fluids stabilized with double layers of surfactants in water reject the known models of rheology and dipole – dipole interaction // Colloid Journal. 2024. Vol. 86, no. 4. P. 538–546. <https://doi.org/10.1134/S1061933X24600362>
4. Ivanov A.O., Kuznetsova O.B. Magnetic properties of dense ferrofluids: An influence of interparticle correlations // Phys. Rev. E. 2001. Vol. 64. P. 041405.
5. The initial magnetic susceptibility of polydisperse ferrofluids: A comparison between experiment and theory over a wide range of concentration / A.Y. Solovyova, O.A. Goldina, A.O. Ivanov, A.V. Lebedev, E.A. Elfimova // Journal of Chemical Physics. 2016. Vol. 145. P. 084909. <https://doi.org/10.1063/1.4961405>
6. Pshenichnikov A.F., Mekhonoshin V.V., Lebedev A.V. Magneto-granulometric analizis of concentrated ferrocolloids // Journal on Magnetism and Magnetic Materials. 1996. Vol. 161. P. 94–102.
7. Pshenichnikov A. F. Equilibrium magnetization of concentrated ferrocolloids // Journal on Magnetism and Magnetic Materials. 1995. Vol. 145. P. 319.
8. Pshenichnikov A.F., Lebedev A.V. Low-temperature susceptibility of concentrated magnetic // Journal of Chemical Physics. 2004. Vol. 121, no. 11. P. 5455. <https://doi.org/10.1063/1.1778135>
9. Лебедев А.В. Дипольное взаимодействие частиц в магнитных жидкостях // Коллоидный журнал. 2014. Т. 76, № 3. С. 363. <https://doi.org/10.7868/S0023291214030100>
10. Elmore W.C. On preparation of the magnetite high dispersed // Phys. Rev. 1938. Vol. 54. P. 309–310.
11. Physico-chemical regularities of obtaining highly dispersed magnetite by the method of chemical condensation / N.M. Gribanov, E.E. Bibik, O.V. Buzunov, V.N. Naumov // Journal on Magnetism and Magnetic Materials. 1990. Vol. 85. P. 7–10.
12. Method of preparing a water-base magnetic fluid: pat. 4094804A USA, H01F 1/445 / Shimoiiizaka J. Appl. 05.01.1977; publ. 13.06.78.
13. Dilution stable water based magnetic fluids: pat. 4208294 USA, H01F 1/44 / Khalafalla S.E., Reimers G.W., Rholl S.A. Appl. 12.02.1979; publ. 13.06.1980.

14. Способ получения феррожидкости: А. с. 457666 СССР, МПК G11B 5/84 / Бибик Е.Е., Лавров И.С. № 1801123/23-26; заявл. 22.06.72; опубл. 25.01.75, Бюл. № 3.
15. Пшеничников А.Ф. Мост взаимной индуктивности для анализа магнитных жидкостей // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 4. С. 88–93.
16. Лебедев А.В. Измерение кривых намагничивания магнитных жидкостей: сравнение метода дифференциальной прогонки и вибрационного магнитометра // Приборы и техника эксперимента. 2024. № 6.
17. Магнитная жидкость для работы в сильных градиентных полях / А.Ф. Пшеничников, А.В. Лебедев, А.В. Радионов, Д.В. Ефремов // Коллоидный журнал. 2015. Т. 77. С. 207.
18. Wertheim M.S. Exact solution of the mean spherical model for fluids of hard spheres with permanent electric moments // J. Chem. Phys. 1971. Vol. 55, no. 9. P. 4291.
19. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей // Собрание избранных трудов. Т. 3. М.: Изд-во АН СССР, 1952.
20. Пшеничников А.Ф., Лебедев А.В., Морозов К.И. Влияние межчастичного взаимодействия на магнитостатические свойства магнитных жидкостей // Магнитная гидродинамика. 1987. № 1. С. 37.

References

1. Shliomis M.I. Magnetic fluids. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk = Physics-Uspekhi*. 1974;112(3):435–458. (In Russ.) <https://doi.org/10.1070/PU1974v017n02ABEH004332>
2. Rosensweig R.E. Ferrohydrodynamics. Cambridge: Cambridge University Press; 1985. 344 p.
3. Lebedev A.V. Magnetic fluids stabilized with double layers of surfactants in water reject the known models of rheology and dipole – dipole interaction. *Colloid Journal*. 2024;86(4):538–546. <https://doi.org/10.1134/S1061933X24600362>
4. Ivanov A.O., Kuznetsova O.B. Magnetic properties of dense ferrofluids: An influence of interparticle correlations. *Phys. Rev. E*. 2001;64: 041405.
5. Solovyova A.Y., Goldina O.A., Ivanov A.O., Lebedev A.V., Elfimova E.A. The initial magnetic susceptibility of polydisperse ferrofluids: A comparison between experiment and theory over a wide range of concentration. *Journal of Chemical Physics*. 2016;145:084909. <https://doi.org/10.1063/1.4961405>.
6. Pshenichnikov A.F., Mekhonoshin V.V., Lebedev A.V. Magneto-granulometric analizis of concentrated ferrocolloids. *Journal on Magnetism and Magnetic Materials*. 1996;161:94–102.
7. Pshenichnikov A.F. Equilibrium magnetization of concentrated ferrocolloids. *Journal on Magnetism and Magnetic Materials*. 1995;145:319.
8. Pshenichnikov A.F., Lebedev A.V. Low-temperature susceptibility of concentrated magnetic. *Journal of Chemical Physics*. 2004;121(11):5455. <https://doi.org/10.1063/1.1778135>
9. Lebedev A.V. Dipole interparticle Interaction in magnetic fluids. *Kolloidnyi zhurnal = Colloid Journal*. 2014;76(3):363. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1061933X14030107>
10. Elmore W.C. On preparation of the magnetite high dispersed. *Phys. Rev.* 1938;54:309–310.
11. Gribanov N.M., Bibik E.E., Buzunov O.V., Naumov V.N. Physico-chemical regularities of obtaining highly dispersed magnetite by the method of chemical condensation. *Journal on Magnetism and Magnetic Materials*. 1990;85: 7–10.
12. Shimoizaka J. Method of preparing a water-base magnetic fluid. United States patent 4094804A. 13 June 1978.
13. Khalafalla S.E., Reimers G.W., Rholl S.A. Dilution stable water based magnetic fluids. United States patent 4208294. 12 February 1979.
14. Bibik E.E., Lavrov I.S. Method of obtaining ferrofluid. Russian Federation patent 457666. 25 January 1975.

15. Pshenichnikov A.F. A mutual-inductance bridge for analysis of magnetic fluids. *Instruments and Experimental Techniques.* 2007;50(4):509–514. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.1134/S0020441207040136>
16. Lebedev A.V. Measurement of magnetization curves of magnetic fluids: comparison of differential sweep method versus vibration magnetometer. *Instruments and experimental technique.* 2024;(6). (In Russ.)
17. Pshenichnikov A.F., Lebedev A.V., Radionov A.V., Efremov D.V. A Magnetic fluid for operation in strong gradient fields. *Kolloidnyi zhurnal = Colloid Journal.* 2015;77(2):196–201. (In Russ.)
18. Wertheim M.S. Exact solution of the mean spherical model for fluids of hard spheres with permanent electric moments. *Journal of Chemical Physics.* 1971;55(9):4291.
19. Frenkel Ya.I. Kinetic theory of liquids. In: Collection of favorites Proceedings. Vol. 3. Moscow: Izd-vo AN SSSR; 1952.
20. Pshenichnikov A.F., Lebedev A.V., Morozov K.I., The influence of interparticle interaction on magnetostatic properties of magnetic fluids. *Magnitnaya gidrodinamika = Magnetohydrodynamics.* 1987;(1):31. (In Russ.)

Информация об авторе / Information about the Author

Лебедев Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории динамики дисперсных систем, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: lav@icmm.ru, ORCID: 0000-0002-3989-7893

Aleksandr V., Lebedev, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher at the Laboratory of Disperse Systems Dynamics, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, the affiliate of the Perm Federal Scientific Research Center, Perm, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-3989-7893