

03;12

О влиянии структурной организации на релаксацию магнитного момента дисперсных частиц в магнитной жидкости

© Д.В. Гладких,¹ Ю.И. Диканский,¹ К.А. Балабанов,² А.В. Радионов³¹ Ставропольский государственный университет,
355009 Ставрополь, Россия

e-mail: genphys@stavsu.ru

² Филиал Военно-воздушной инженерной академии им. проф. Н.Е. Жуковского,
355003 Ставрополь, Россия³ Научно-производственное внедренческое предприятие „Феррогидродинамика“,
54030 Николаев, Украина

(Поступило в Редакцию 14 марта 2005 г.)

Исследована комплексная магнитная восприимчивость магнитной жидкости на основе вакуумного масла, получившей применение в технике в качестве магнитоуплотняющей среды. На основе анализа полученных результатов установлены особенности процессов релаксации магнитного момента дисперсных частиц, связанные с их структурной организацией под воздействием внешних факторов.

Введение

Исследованию магнитных и структурных свойств магнитных жидкостей (МЖ) посвящено достаточно большое количество работ [1,2]. Наиболее распространенными и в большей степени исследованными являются магнитные жидкости на основе керосина. Однако на практике применение получили жидкости на более вязких основах: минеральных маслах и кремнийорганических средах. Эффекты взаимодействия частиц в таких МК и их структурные свойства остаются до настоящего времени малоизученными. Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению влияния структурной организации на процессы релаксации магнитного момента дисперсных частиц в магнитной жидкости на основе вакуумного масла.

Методика эксперимента и объект исследования

В качестве исходного образца для исследования была использована магнитная жидкость с магнетитовыми частицами на основе вакуумного масла с объемной концентрацией $\varphi = 8.6\%$ и намагниченностью насыщения 41.3 кА/м . Образец представлял собой магнитную жидкость однородной консистенции, устойчивую относительно расслоения при изменении температуры и воздействии магнитных полей. Из исходного образца путем разбавления жидкостью-носителем был получен концентрационный ряд магнитных жидкостей, состоящий из 14 образцов, концентрация самого разбавленного из которых составляла $\varphi = 0.67\%$. Магнитная восприимчивость измерялась мостовым методом. Действительная χ' и мнимая χ'' части комплексной магнитной восприимчивости рассчитывались по изменению индуктивности и добротности соленоида при внесении в него исследуемого образца. Измерения осуществлялись с

помощью измерителя иммитанса LCR-817, погрешность определения эффективного значения действительной части магнитной восприимчивости χ' не превышала 0.1% , мнимой части χ'' — 0.3% . Частотные зависимости восприимчивости исследовались без и при воздействии внешнего постоянного однородного магнитного поля.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Оказалось, что начальный участок концентрационной зависимости магнитной восприимчивости мало отличается от линейного вплоть до концентрации $\sim 4\%$ (рис. 1, кривая 1).

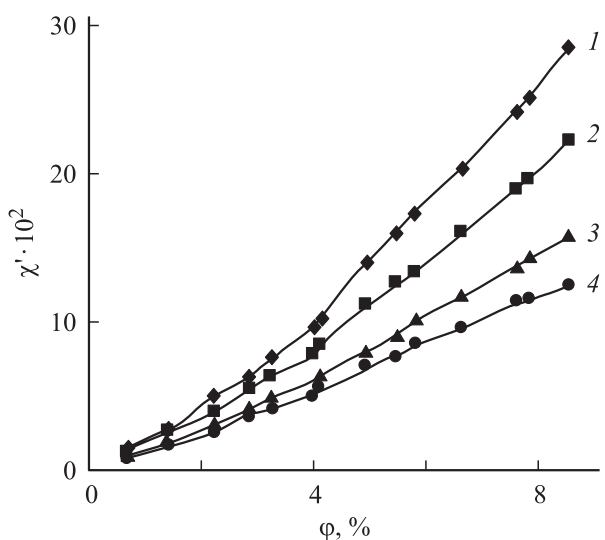


Рис. 1. Зависимость магнитной восприимчивости от концентрации дисперсных частиц при воздействии постоянного магнитного поля. H , кА/м: 1 — 0, 2 — 2.15, 3 — 4.3, 4 — 5.8.

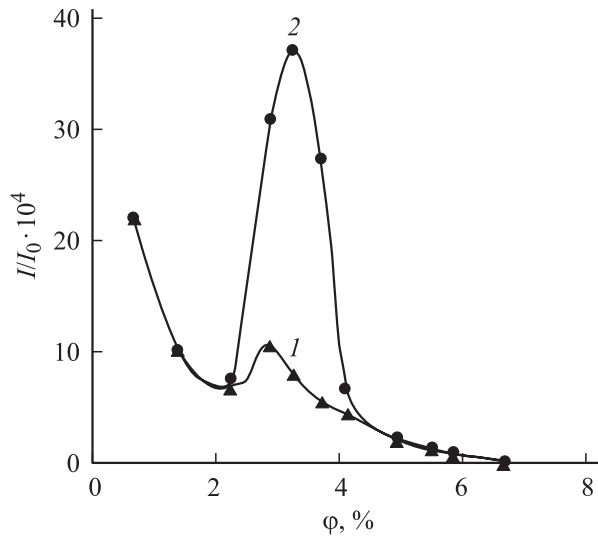


Рис. 2. Зависимость относительной интенсивности светорассеяния от концентрации дисперсных частиц.

Воздействие внешнего постоянного магнитного поля приводит к „сглаживанию“ кривой $\chi'(\theta)$, так что при достаточно большой напряженности постоянного магнитного поля она становится близкой к линейной во всем исследованном концентрационном интервале (рис. 1, кривые 2–4).

Наблюдения через оптический микроскоп показали, что при изменении концентрации путем разбавления исходного, первоначально однородного образца в области концентраций, соответствующих 4%, в магнитной жидкости начинается процесс структурообразования. При этом наибольшее число агрегатов наблюдается в образцах с концентрацией дисперсной фазы $\sim 3\text{--}3.5\%$, что подтверждается также результатами исследования светорассеяния тонкими слоями исследованных образцов (рис. 2, кривая 1 получена без магнитного поля, кривая 2 — при воздействии магнитного поля, направленного вдоль плоскости слоя магнитной жидкости, напряженностью $H = 4.6 \text{ kA/m}$). Здесь I_0 — интенсивность падающего на образец света, I — интенсивность рассеянного света.

Можно предположить, что при разбавлении первоначально однородной магнитной жидкости за счет возникающего дефицита поверхностно-активного вещества образуются агрегаты с частично замкнутыми магнитными моментами однодоменных дисперсных частиц. Наличие таких агрегатов и может быть причиной линейности начального участка концентрационной зависимости. Под действием внешнего постоянного магнитного поля происходит объединение агрегатов в цепочки, которые выстраиваются вдоль направления поля, что и приводит к усилению анизотропного светорассеяния при воздействии поля, наблюдающегося в эксперименте.

Оказалось, что для всех исследованных образцов частотные зависимости мнимой части комплексной маг-

нитной восприимчивости имеют различный характер в случае получения их без и при воздействии внешнего постоянного магнитного поля. В отсутствие внешнего поля χ'' монотонно возрастает (рис. 3, кривая 1) с увеличением частоты измерительного поля. При наложении магнитного поля в частотной зависимости мнимой части $\chi''(f)$ появляется максимум при некоторой частоте, зависящей от напряженности постоянного магнитного поля (рис. 3, кривые 2–7). При этом первоначально при увеличении напряженности поля от 0 до $\sim 1.6 \text{ kA/m}$ частота, соответствующая максимуму χ'' , несколько уменьшается, а при последующем повышении напряженности постоянного магнитного поля начинает увеличиваться. Расчет эффективного времени релаксации магнитного момента дисперсных частиц при использовании значения частоты максимума ($\tau = 1/f_p$) позволил построить зависимость τ от напряженности внешнего магнитного поля, представленную на рис. 4 (на рис. 3 и 4 приведены полученные зависимости для образца с концентрацией $\phi = 8.6\%$, для остальных образцов полученные зависимости имеют аналогичный характер). Проведенные исследования позволили получить также зависимость времени релаксации от концентрации дисперсной фазы ϕ при разных значениях магнитного поля (рис. 5).

Обнаруженные особенности релаксации магнитного момента, по-видимому, связаны с возникновением структурной организации в системе дисперсных частиц при воздействии внешнего магнитного поля, что ранее теоретически исследовалось в работах [3–6]. В частности, в [3] рассматривается изменение времени релаксации при формировании в магнитных жидкостях цепочечных агрегатов.

Качественное согласие полученных результатов с выводами работы [3] позволяет предположить что, наблю-

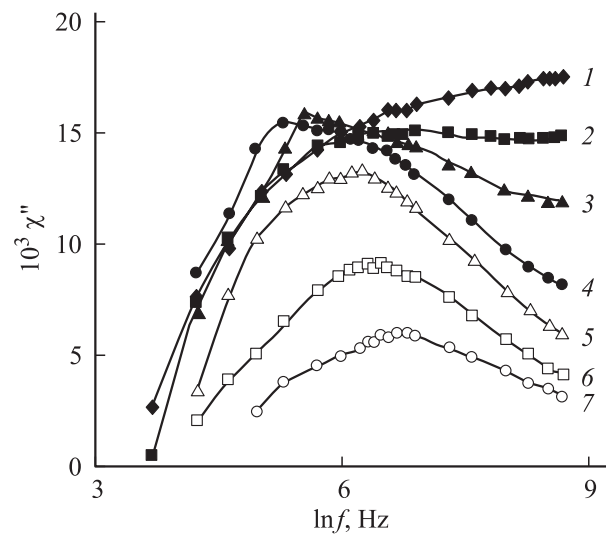


Рис. 3. Частотная зависимость мнимой части комплексной магнитной восприимчивости при воздействии постоянного магнитного поля. H , kA/m: 1 — 0, 2 — 0.4, 3 — 0.8, 4 — 1.75, 5 — 3.26, 6 — 6.45, 7 — 9.67.

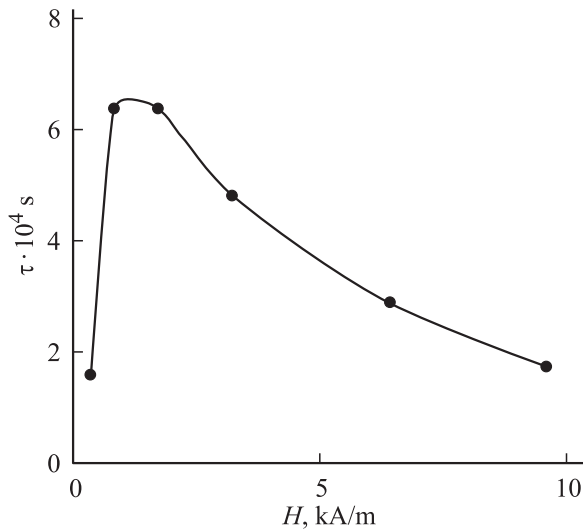


Рис. 4. Зависимость времени релаксации от напряженности постоянного магнитного поля.

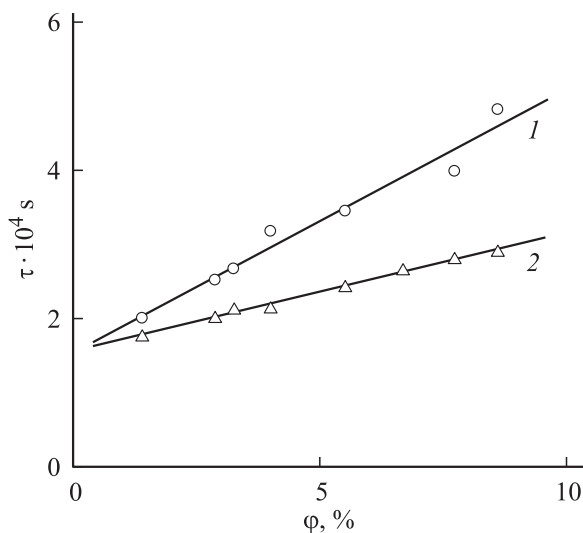


Рис. 5. Зависимость времени релаксации от концентрации дисперсных частиц при воздействии постоянного магнитного поля. $H = 3.26$ (1), 6.45 kA/m (2).

дающиеся особенности магнитных свойств исследованных образцов магнитной жидкости связаны с образованием цепочечных агрегатов при воздействии внешнего постоянного магнитного поля. Параметры цепочек зависят от концентрации дисперсной фазы, первоначального структурного состояния образца и от напряженности магнитного поля.

Заметим, что в действительности в магнитной жидкости имеет место разброс частиц по размеру. Поэтому магнитная жидкость не описывается дискретным набором времен релаксации: в ней представлены все времена релаксации τ с весом $c(\tau)$. Функция $c(\tau)$ вводится так, что величина $c(\tau)d\tau$ является частью равновесной дифференциальной магнитной восприимчивости dM/dH

с временем релаксации от τ до $\tau + d\tau$. В этом случае для компонент комплексной магнитной восприимчивости можно записать

$$\chi'(\omega) = \int_0^{\infty} \frac{c(\tau)d\tau}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad \chi''(\omega) = \int_0^{\infty} \frac{\omega c(\tau)d\tau}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$.

Функцию распределения времен релаксации $c(\tau)$ в формулах (1) можно вычислить по экспериментально полученным зависимостям $\chi'(\omega)$ и $\chi''(\omega)$. Такая задача была решена в работе [7], где получено, что при достаточно малых частотах поведение намагниченности может быть описано одним эффективным временем релаксации τ_{ef}

$$\tau_{ef} = \frac{1}{\kappa} \int_0^{\infty} c^*(\xi)d\xi, \quad \kappa = \int_0^{\infty} c(\tau)d\tau. \quad (2)$$

Здесь функция $c^*(\xi)$ вводится в результате замены переменных ($\tau = \exp(\beta\xi)$, $c(\tau) = c^*(\xi)\exp(-\beta\xi)$, $\beta = \ln 10$) таким образом, чтобы выполнялось соотношение $c^*(\xi)d\xi = c(\tau)d\tau$.

Наибольший вклад в эффективное время релаксации дают времена τ с наибольшим значением c^* . Однако вклад в магнитную восприимчивость жидкости частиц пропорционален квадрату их объема. Поэтому крупные частицы оказывают существенное влияние на магнитные свойства жидкости, несмотря на их малое количество.

В постоянном магнитном поле время релаксации частиц уменьшается с ростом поля. Зависимость времени релаксации от поля определяется параметром Ланжевена $M_S V H / kT$ [8]. Для крупных частиц параметр Ланжевена становится большим даже в слабых полях. В результате этого происходит резкое уменьшение функции $c^*(\xi)$. Также при одном и том же поле крупные частицы находятся ближе к состоянию насыщения, чем более мелкие. Поэтому вклад крупных частиц в восприимчивость с ростом поля уменьшается быстрее, чем вклад мелких. Вследствие этого происходит уменьшение времени релаксации. Происходящие в магнитной жидкости под действием магнитного поля процессы агрегирования приводят к увеличению влияния указанных выше процессов на величину времени релаксации.

Можно предположить, что именно с этими процессами связаны обнаруженные в настоящей работе особенности релаксации намагниченности. В первоначально однородной магнитной жидкости при наложении внешнего постоянного магнитного поля начинается процесс образования цепочечных агрегатов. Это приводит к возрастанию времени релаксации (см. рис. 4). При дальнейшем увеличении напряженности поля рост цепочек продолжается, но здесь решающую роль играют эффекты, связанные с укрупнением агрегатов, что приводит к уменьшению времени релаксации τ .

В заключение также отметим, что с возникновением структурного упорядочения при воздействии постоянного магнитного поля, по-видимому, и связана хорошая работоспособность исследованного образца в магнитожидкостных уплотнениях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 04-02-16901).

Список литературы

- [1] *Фертман В.Е.* Магнитные жидкости. Минск: Высшая школа, 1988. 184 с.
- [2] *Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс А.О.* Магнитные жидкости. Рига: Зинатне, 1986. 386 с.
- [3] *L.Yu. Iskakova, A.Yu. Zubarev.* // JMMM. 2002. Vol. 252. P. 74–76.
- [4] *S. Taketomi.* // Phys. Rev. E. 1998. Vol. 57. N 3. P. 3073–3086.
- [5] *Пацегон Н.Ф.* // Магнитная гидродинамика. 1991. № 3. С. 10–16.
- [6] *Пацегон Н.Ф.* // Магнитная гидродинамика. 1991. № 4. С. 40–44.
- [7] *Агабекян Э.М., Иванов А.Г., Кирюшин В.В.* и др. // Магнитная гидродинамика. 1986. № 2. С. 65–72.
- [8] *Марценюк М.А., Райхер Ю.Л., Шлиомис М.И.* // ЖЭТФ. 1973. Т. 65. № 2. С. 834–840.