

03

Влияние гидродинамических межчастичных взаимодействий на динамическую восприимчивость монодисперсной магнетитовой жидкости на базе керосина

© А.В. Лебедев

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

E-mail: lav@icmm.ru

Поступило в Редакцию 29 октября 2015 г.

Измерена концентрационная зависимость динамической восприимчивости магнитной жидкости в диапазоне частот от 1 Hz до 100 kHz при различных температурах. При низких температурах сдвиг фаз между намагниченностью и напряженностью поля уменьшается с ростом концентрации. Уменьшение потерь энергии в концентрированных образцах объясняется взаимной синхронизацией вращения частиц в противоположные стороны вследствие их гидродинамического взаимодействия.

Магнитные жидкости [1] (коллоидные растворы однодоменных частиц магнетиков нанометрового размера), синтезированные в начале 60-х годов прошлого столетия [2], являются примером неупорядоченных дипольных систем с сильным межчастичным взаимодействием. Дипольное взаимодействие частиц значительно (в несколько раз) увеличивает статическую восприимчивость магнитных жидкостей [3]. Вопрос о влиянии межчастичных взаимодействий на динамическую восприимчивость остается до конца невыясненным и в настоящее время. Из нашей ранней экспериментальной работы [4] следует вывод о том, что межчастичные взаимодействия можно учесть опосредованно через начальную статическую восприимчивость жидкости. В дальнейшем делались неоднократные теоретические попытки учесть влияние дипольного взаимодействия на динамическую восприимчивость [5–8]. Но полученные результаты весьма противоречивы.

Основные параметры образцов магнитной жидкости ($T = 27^\circ\text{C}$)

№	χ	η , cPs	ϕ
1	2.02	1.69	0.137
2	3.08	2.33	0.186
3	5.04	4.76	0.261
4	8.37	11.0	0.362
5	12.37	47.3	0.459
6	14.47	96.9	0.504
7	16.06	198.3	0.534

В предлагаемой работе приводятся новые экспериментальные результаты по концентрационной зависимости динамической восприимчивости магнитной жидкости, которые свидетельствуют о существенном влиянии на динамическую восприимчивость гидродинамического взаимодействия между частицами.

В экспериментах использовалась магнитная жидкость на основе частиц магнетита, стабилизированных в керосине олеиновой кислотой. Для синтеза жидкости использовалась технология химического осаждения [2]. Было приготовлено 7 образцов магнитной жидкости различной концентрации с одинаковым дисперсным составом. Концентрация в образцах подбиралась таким образом, чтобы их восприимчивости отличались друг от друга примерно в полтора раза. Основные параметры образцов представлены в таблице.

Восприимчивость χ_0 и вязкость η измерялись непосредственно для каждого образца. Гидродинамическая концентрация ϕ рассчитывалась по параметрам распределения частиц по размерам. Последние определялись из анализа кривой намагничивания образца № 3 при температуре 12°C [9]. Анализ дал следующие параметры жидкости: начальная восприимчивость $\chi_0 = 5.13$, намагниченность насыщения $M_\infty = 41.1 \text{ kA/m}$, числовая концентрация частиц $n = 1.27 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, средний магнитный момент $\langle m \rangle = 3.25 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ и средний квадрат магнитного момента $\langle m^2 \rangle = 1.97 \cdot 10^{-37} \text{ A}^2 \cdot \text{m}^4$. Распределение частиц по размерам аппроксимировалось Г-распределением с параметрами $x_0 = 0.836 \text{ nm}$, $\alpha = 11.1$.

Следует отметить, что проанализированный образец по сравнению с образцами, исследованными в работе [4], имеет рекордно узкое

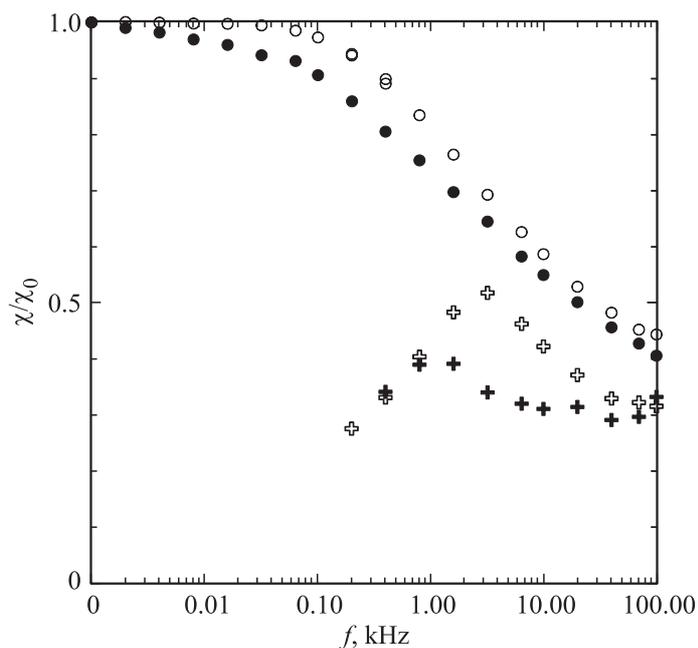


Рис. 1. Нормированные частотные зависимости динамической восприимчивости образцов № 1 (пустые символы) и № 7 (заполненные символы) при $T = -41.2^\circ\text{C}$. Круги соответствуют действительной части восприимчивости, кресты — мнимая часть. Масштаб для мнимой части увеличен в 3 раза.

распределение частиц по размерам. Это обстоятельство сужает спектр времен релаксации намагниченности. Перемагничивание частиц возможно двумя путями: вращением частицы в жидкости (броуновский механизм) и вращением магнитного момента относительно частицы (неелевский механизм) [1]. Оба механизма имеют соответствующее характерное время. Главную роль играет механизм с меньшим временем. При понижении температуры неелевское время релаксации нарастает существенно быстрее, и магнитные моменты вмораживаются в тело частиц. Преобладающим становится броуновский механизм релаксации. Частотные зависимости динамической восприимчивости приобретают квази-дебаевский вид.

У синтезированных образцов была измерена частотная зависимость восприимчивости в диапазоне частот от 1 Hz до 100 kHz при пяти различных температурах: -41.2°C , -21.8 , -0.5 , $+27.1$ и $+63.7^{\circ}\text{C}$. Сразу можно отметить, что зависимости $\chi(f)$ у образцов разных концентраций не являются подобными, т.е. нормированные на начальную статическую восприимчивость кривые $\chi(f)$ не совпадают. В качестве примера на рис. 1 приведено сравнение нормированных зависимостей $\chi(f)$ при температуре -41.2°C для образцов № 1 и № 7 (минимальной и максимальной концентраций). Зависимости $\chi(f)$ образцов других концентраций занимают промежуточное положение и не показаны, чтобы не загромождать рисунок.

В первую очередь обращает на себя внимание различие в мнимой части восприимчивости. Максимум χ_2 у концентрированного образца смещен в сторону низких частот. Качественно так и должно быть, однако количественного согласия нет. Соответствующие максимумам χ_2 частоты отличаются в три раза, тогда как вязкость образцов отличается на три порядка (с понижением температуры вязкость концентрированного образца нарастает быстрее). Различие в амплитуде максимумов не может быть объяснено влиянием вязкости даже качественно.

Для выяснения вопроса о влиянии межчастичных взаимодействий на динамическую характеристику более наглядным, на наш взгляд, является рассмотрение сдвига фаз $\Delta\phi(f)$ между намагниченностью и напряженностью поля в зависимости от концентрации. Очевидно, что в случае пропорционального изменения динамической восприимчивости сдвиг фаз должен оставаться постоянной величиной.

На рис. 2 представлено семейство частотных характеристик $\Delta\phi(f)$. Образцам с меньшей концентрацией соответствуют кривые, лежащие выше. Из рис. 2 следует, что в диапазоне частот от 1 до 100 kHz $\Delta\phi$ существенно зависит от концентрации. Для первых трех образцов зависимости $\Delta\phi(f)$ близки. Очевидно, здесь межчастичные взаимодействия еще не влияют на динамическую восприимчивость. Затем с увеличением концентрации $\Delta\phi$ уменьшается, т.е. при сближении частиц их взаимодействие уменьшает запаздывание намагниченности и соответственно потери энергии на перемагничивание. Уменьшение сдвига фаз между намагниченностью и напряженностью поля происходит вопреки сильному увеличению вязкости жидкости.

Обнаруженные зависимости, на наш взгляд, можно объяснить единственным образом. Основная причина, уменьшающая сдвиг фаз $\Delta\phi$ и со-

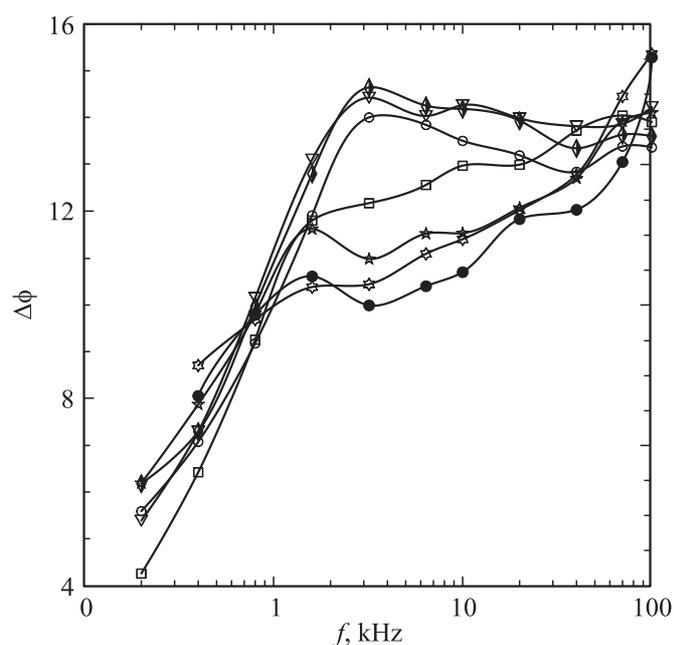


Рис. 2. Частотные зависимости сдвига фаз между намагниченностью и напряженностью поля. $T = -41.2^\circ\text{C}$. Образцы № 1–7: 1 — пустые круги, 2 — ромбы, 3 — треугольники, 4 — квадраты, 5 — звезды, 6 — шестиконечные звезды, 7 — заполненные круги.

ответственно потери энергии на перемагничивание жидкости состоит в согласовании вращения соседних магнитных частиц в противоположные стороны. Синхронизация вращения частиц происходит вследствие их гидродинамического взаимодействия. При низких концентрациях гидродинамическое взаимодействие частиц мало и не вызывает заметной синхронизации. С увеличением концентрации гидродинамическое взаимодействие начинает влиять на вращение частиц. При этом существенным фактором, на наш взгляд, является высокий уровень монодисперсности магнитной жидкости. Именно монодисперсная система допускает согласованное вращение частиц в противоположных направлениях. Понятно, что при таком согласовании резко уменьшается момент вязких сил,

действующий на частицы, что и приводит к уменьшению сдвига фаз между намагниченностью и напряженностью поля.

С увеличением температуры частотная зависимость $\Delta\phi(f)$ слабее меняется с концентрацией и для самой высокой температуры $T = 63.7^\circ\text{C}$ кривые $\Delta\phi(f)$ для разных концентраций практически сливаются в одну. Очевидно, что с увеличением температуры магнитные моменты получают свободу для вращения относительно частиц и взаимодействие между намагниченностью и гидродинамическими вихрями выключается. Компоненты динамической восприимчивости меняются с концентрацией подобным образом.

Несомненно, выдвинутая гипотеза нуждается в дальнейшей проработке. Для этого планируется выполнить серию экспериментов на образцах с существенно более широким распределением частиц по размерам. Очевидно, в этом случае влияние гидродинамического взаимодействия между частицами на динамическую восприимчивость должно уменьшиться. Также предполагается выполнить эксперименты по измерению динамической восприимчивости во вращающемся поле. В этом случае исключается сама возможность согласованного вращения соседних частиц в противоположных направлениях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 15-12-10003).

Список литературы

- [1] Шлюмис М.И. // УФН. 1974. Т. 112. С. 435.
- [2] Розенцвейг Р. Феррогидродинамика: Пер. с англ. под ред. В.В. Гогосова. М.: Мир, 1989. (Rosensweig R.E. Ferrohydrodynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.)
- [3] Лебедев А.В. // Коллоидный журнал. 2014. Т. 76(3). С. 363.
- [4] Пшеничников А.Ф., Лебедев А.В. // ЖЭТФ. 1989. Т. 95(3). С. 869.
- [5] Зубарев А.Ю., Юшков А.В. // ЖЭТФ. 1998. Т. 87(3). С. 484.
- [6] Felderhof B.U., Jones R.B. // J. Phys.: Condens. Matter. 2003. V. 15(23). P. 4011.
- [7] Ilg P., Hess S. // J. Phys. Sci. 2003. V. 58(11). P. 589.
- [8] Dejardin P.M., Ladieu F. // J. Chem. Phys. 2014. V. 140(3). P. 34 506.
- [9] Pshenichnikov A.F., Mekhonoshin V.V., Lebedev A.V. // J. Magn. Magn. Mater. 1996. V. 161. P. 94.