

ДИНАМИЧЕСКАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Д. В. Ефремов^а, А. Ф. Пшеничников^б

^аПермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Пермь, Букирева, 15

^бИнститут механики сплошных сред УрО РАН, 614013, Пермь, Королева, 1

Поведение магнитных жидкостей в переменном магнитном поле имеет ряд особенностей, главным из которых является широкий (несколько порядков) спектр времён релаксации намагниченности. Модуль восприимчивости изменяется в диапазоне от десятых долей до одной-двух сотен единиц СИ в зависимости от температуры, концентрации магнитной фазы и дисперсного состава коллоидных частиц. По этой причине для анализа динамической восприимчивости магнитных жидкостей необходимы приборы, обладающие высокой чувствительностью и перекрывающие широкий диапазон частот зондирующего поля – примерно от 10 Гц до 1 ГГц. Наиболее ценную информацию о свойствах магнитных жидкостей представляют измерения на низкочастотной восприимчивости в диапазоне частот 10 Гц – 100 кГц.

Наиболее перспективно применение моста взаимной индуктивности для анализа динамической восприимчивости магнитной жидкости. Главное преимущество моста взаимной индуктивности перед другими методами измерения магнитной восприимчивости состоит в том, что отпадает необходимость учёта омического сопротивления катушки. Эти параметры не входят в расчётную формулу (1), что позволяет производить измерения в диапазоне низких и инфранизких частот, недоступных для других методов.

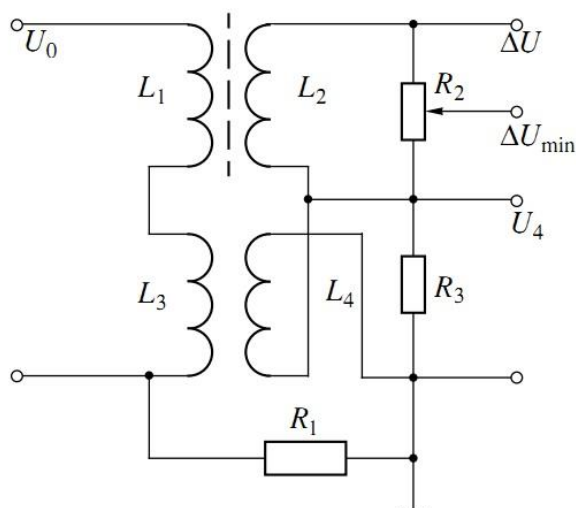


Рис. 1. Принципиальная схема моста взаимной индуктивности. L_1 , L_3 – намагничивающие соленоиды; L_2 , L_4 – измерительная и компенсационная катушки; R_1 – безындукционный резистор

Принципиальная схема моста приведена на рис. 1. Мост состоит из двух пар катушек взаимной индуктивности. Первая пара образована двумя длинными коаксиальными однослойными соленоидами L_1 , L_2 и содержит исследуемый образец магнитной жидкости. Вторая пара образована соленоидами L_3 , L_4 . Соленоиды L_1 и L_3 являются источниками слабого магнитного. Их обмотки соединены (для синфазности колебаний магнитного поля) и подключены к источнику переменного тока. Сила тока и амплитуда магнитного поля определяются по напряжению на безындуктивном резисторе R_1 . Резисто-

ры R_2 , R_3 введены для тонкой коррекции моста и уменьшения помех. Измерительная (L_2) и компенсационная (L_4) катушки включены навстречу друг другу. В отсутствие образца электродвижущие силы, индуцируемые в этих катушках, совпадают по амплитуде и фазе, поэтому разностный сигнал ΔU равен нулю. В присутствии образца разностный сигнал пропорционален восприимчивости магнитной жидкости, частоте и амплитуде магнитного поля, но отношение $\Delta U/U_4$ зависит только от магнитной восприимчивости и геометрических параметров катушки. Так как точное измерение сдвига фаз между двумя малыми по величине сигналами связано с серьёзными проблемами, для вычисления χ_2 измерялось дополнительно напряжение ΔU_{\min} на движке потенциометра R_2 . Положение движка выбиралось из условия минимума напряжения. В этом случае действительная и мнимая части динамической восприимчивости определяются системой уравнений (1). σ – отношение площадей поперечного сечения измерительной катушки и цилиндрического образца магнитной жидкости. [1]

$$\chi = \sqrt{\chi_1^2 + \chi_2^2} = \sigma \frac{\Delta U}{U_4}, \quad \chi_2 = \frac{(\sigma + \chi_1)\Delta U_{\min}}{U_4 \sqrt{1 - \frac{\Delta U_{\min}^2}{U_4^2}}}; \quad (1)$$

Детали эксперимента. Действительная и мнимая части динамической восприимчивости измерялись с помощью моста взаимной индуктивности при комнатной температуре. Магнитная жидкость заливалась в пробирку с внутренним диаметром 5.93 мм и длиной 110 мм. Напряжение на выходе моста подавалось вначале на селективный нановольтметр UNIPAN2-37, используемый в качестве усилителя, а затем на цифровой вольтметр. Частота зондирующего поля менялась в интервале от 10 Гц до 80 кГц. В опыте использовалась магнитная жидкость на основе вакуумного масла VM-4. Действительная и мнимая части динамической восприимчивости вычислены с помощью системы уравнений (1), полученные результаты представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

Отклонение действительной части динамической восприимчивости, в интервале зондирующего поля от 10 Гц до 100 Гц, от предполагаемого результата, предположительно, вызвано низкочастотными наводками от сети переменного тока.

Обработка экспериментальных данных. При обработке результатов предполагалось, что форма агрегатов не сильно отличается от сферической. Используемый в данной работе метод анализа основан на известной зависимости броуновского времени релаксации τ_B магнитного момента частицы от её размера. Для коллоидных частиц это время равно

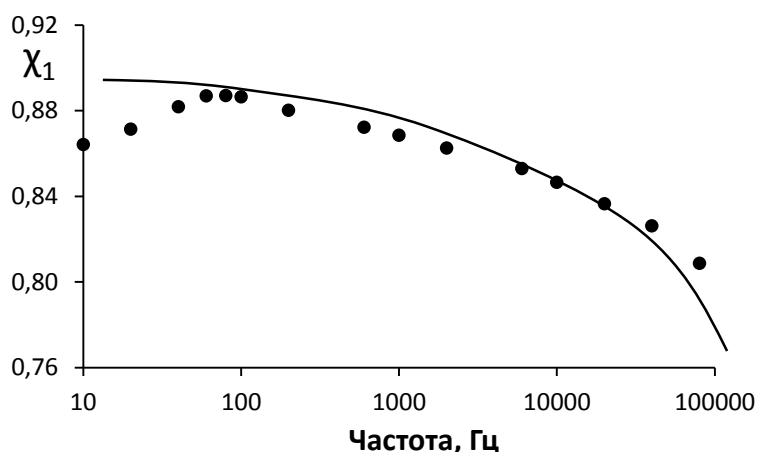


Рис. 2. Зависимость действительной части динамической восприимчивости магнитной жидкости от частоты зондирующего поля. Точками отмечены экспериментальные данные. Линией показана динамическая восприимчивость, рассчитанная с помощью формул (3)

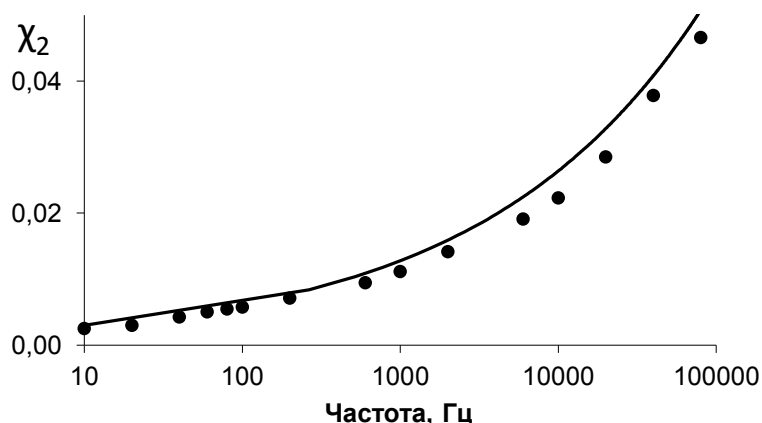


Рис. 3. Зависимость мнимой части динамической восприимчивости магнитной жидкости от частоты зондирующего поля. Точками отмечены экспериментальные данные. Линией показана динамическая восприимчивость, рассчитанная с помощью формул (3)

$$\tau_B = \frac{3\eta \pi d^3}{kT 6}; \quad (2)$$

где η – динамическая вязкость дисперсионной среды, k – константа Больцмана, T – температура. Зная время релаксации можно легко найти характерный размер частицы. Время релаксации определяется из

зависимостей действительной и мнимой частей восприимчивости от частоты зондирующего поля.

Полидисперстность реальных магнитных жидкостей и существование агрегатов позволяет все частицы и агрегаты разделить на достаточно узкие фракции, отличающиеся временем релаксации магнитного момента. Это позволяет представить динамическую восприимчивость в виде суперпозиции дебаевских функций

$$\chi_1 = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2}; \quad (3)$$

$$\chi_2 = \sum_{i=1}^N \frac{A_i \omega \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2}$$

В данной работе все частицы были разделены на 15 фракций, соответствующее время релаксации каждой фракции было привязано к одной из реперных частот соотношением $\omega_i \tau_i = 1$. Ещё одна фракция была представлена частицами с пренебрежимо малым временем релаксации, и её вклад A_0 в восприимчивость не зависел от частоты зондирующего поля. В итоге получилась система из 30 уравнений с 30 константами и с 15 неизвестными, которая решалась с помощью математического пакета Maple с условием не отрицательности спектральных амплитуд A_i . Спектральные амплитуды рассчитывались по формуле

$$A_i = 2 \left[\chi_1(\omega_i) - A_0 - \sum_{j \neq i}^N \frac{A_j}{1 + \omega_i^2 \tau_j^2} \right]; \quad (4)$$

при использовании экспериментальных данных для действительной части восприимчивости и

$$A_i = 2 \left[\chi_2(\omega_i) - \sum_{j \neq i}^N \frac{A_j \omega_i \tau_j}{1 + \omega_i^2 \tau_j^2} \right]; \quad (5)$$

при использовании данных для мнимой части восприимчивости. Относительная погрешность измерения $\chi_1(\omega)$ в два-три раза меньше погрешности измерения $\chi_2(\omega)$, уравнение (9) позволяет получить более точное значение амплитуд [2]. Зависимость действительной и мнимой части динамической восприимчивости, вычисленные с помощью спектральных амплитуд, от частоты зондирующего поля представлены на рисунках 2 и 3 соответственно.

Все частицы были разделены дополнительно на две группы в зависимости от величины полного диаметра: частицы с полным диаметром $d < d_{\max} = 30$ нм и кластеры с эффективным диаметром больше 30 нм.

Внутри каждой группы проводилось усреднение по фракциям, с помощью формулы (6). Таким образом, основным результатом обработки дисперсионных кривых была информация о средних диаметрах отдельных частиц и эффективных диаметрах кластеров.

$$\langle d \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N A_i d_i}{\sum_{i=1}^N A_i}; \quad (6)$$

В результате данной операции было вычислено, что средний диаметр частицы = 9,4 нм, а эффективный диаметр кластера = 64 нм. Что хорошо сочетается с результатом, полученным в [2].

Список литературы

1. Пшеничников А. Ф. Мост взаимной индуктивности для анализа магнитных жидкостей // Приборы и техника эксперимента, 2007.
2. Лахтина Е. В., Пшеничников А. Ф. Дисперсия магнитной восприимчивости и микроструктура магнитной жидкости // Коллоидный журнал, 2006, том 68, № 3.