

ЭКСПРЕССНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ НАСЫЩЕНИЯ И МАГНИТНОГО МОМЕНТА НАНОЧАСТИЦ В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ С ПОМОЩЬЮ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Санкт-Петербургский государственный
технологический институт (технический университет)
190013, Санкт-Петербург, Московский пр. 26

Предложен экспрессный метод оценки намагниченности насыщения и магнитного момента парамагнитных наночастиц магнитных жидкостей по двум точкам экспериментальной зависимости намагниченности от напряженности намагничивающего поля. Сравнение предлагаемого метода с известным методом определения этих параметров по наклону кривой намагничивания на начальном и конечном участках показало удовлетворительное соответствие результатов.

Ключевые слова: магнитная жидкость, намагниченность насыщения, магнитный момент наночастиц, определение по двум точкам кривой намагничивания.

Введение

Магнитный момент наночастиц и намагниченность насыщения магнитной жидкости являются основными характеристиками, определяющими её магнитные свойства. Поэтому измерение этих параметров имеет большое значение для контроля качества магнитных жидкостей при их производстве и применении.

Для определения магнитного момента наночастиц P и намагниченности насыщения $M_{\text{нас}}$ магнитной жидкости обычно исследуют её кривую намагничивания (зависимость намагниченности M от напряженности намагничивающего поля H_n). На начальном участке кривой, где выполняется закон Кюри, намагниченность

$$M = M_{\text{нас}} \cdot \xi / 3,$$

где $\xi = P \cdot \mu_0 \cdot H_n / kT$ - параметр Ланжевена.

Магнитная восприимчивость на этом участке кривой

$$\chi_{\text{нач}} = (M/H_n) = M_{\text{нас}} \cdot P \cdot \mu_0 / 3kT.$$

На участке кривой намагничивания вблизи насыщения

$$M = M_{\text{нас}} [1 - (1/\xi)].$$

Построив зависимость M от $1/\xi$, при $(1/\xi) \rightarrow 0$ получаем $M = M_{\text{нас}}$. Разделив $\chi_{\text{нач}}$ на $(M_{\text{нас}} \mu_0 / 3kT)$, находим P :

$$P = \chi_{\text{нач}} 3kT / \mu_0 M_{\text{нас}}$$

По формуле: $n = M_{\text{нас}} / P$ можно найти концентрацию ферромагнитных наночастиц [1]. Пример определения параметров магнитной жидкости таким методом с применением ЯМР описан в работе [2]. Намагниченность экспериментально находилась по формуле

$$M = (B/\mu_0) - H,$$

где B и H - средние индукция и напряженность магнитного поля внутри жидкости, измеряемые методом ЯМР. Напряженность намагничивающего поля $H_n = B/\mu_0$. Определением M при разных значениях H_n получена кривая

намагничивания, содержащая 20 экспериментальных точек, и по наклонам зависимостей M от ξ при малых H_n и M от $1/\xi$ при больших H_n определены значения $P \approx 4,4 \cdot 10^{-19} \text{ Ам}^2$, $M_{\text{нас}} \approx 8100 \text{ А/м}$ и $n = 1,8 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Для исследования магнитных жидкостей таким способом требуется иметь большое количество экспериментальных точек зависимости M от H_n . Кроме того, на участке кривой намагничивания вблизи насыщения напряженность поля должна достигать достаточно большого значения ($H_n \approx 1000 \text{ А/м}$), получение которого требует специальной магнитной системы. В этом трудности метода определения P , $M_{\text{нас}}$ и n по наклону начального и конечного участков кривой намагничивания.

Сущность предлагаемого метода

В предлагаемом методе вместо измерения 10-15 значений намагниченности M при разных напряженностях намагничивающего поля H_n достаточно измерить два значения M . Одно значение $M = M_1$ нужно измерить в слабом поле $H_n = H_{n1}$, когда $\xi \leq 0,5$. При этом выполняется закон Кюри,

$$M_1 = M_{\text{нас}} \cdot P \cdot \mu_0 \cdot H_{n1} / 3kT \text{ и } \chi_1 = (M_1/H_{n1}) = \chi_{\text{нач}}.$$

Другое значение намагниченности $M = M_2$ нужно измерить в более сильном поле $H_n = H_{n2}$, когда $\xi \geq 1$. В этом случае

$$M_2 = M_{\text{нас}} \cdot La(\xi_2),$$

где $La(\xi_2)$ - функция Ланжевена при $\xi = \xi_2$.

По измеренным значениям M_1 , M_2 , H_{n1} , H_{n2} , находим магнитные восприимчивости

$$\chi_{\text{нач}} = M_1/H_{n1}, \quad \chi_2 = M_2/H_{n2} \text{ и параметр } \alpha_2 = \chi_2/\chi_{\text{нач}} = M_2 H_{n1} / M_1 H_{n2},$$

¹ Жерновой Александр Иванович, д-р техн. наук, профессор, каф. общей физики, e-mail: azhspb@rambler.ru

² Дьяченко Семен Владимирович, аспирант, каф. общей физики, e-mail: azhspb@rambler.ru

который зависит от $\xi_2 = P\mu_0 H_{n2}/(kT)$: $\alpha_2 = 3La(\xi_2)/\xi_2$. Зависимость параметра α от ξ приведена на рисунке, кривая 1. По этой кривой можно, зная $\alpha = \alpha_2$, найти значение $\xi = \xi_2$, что при известном значении H_{n2} позволяет определить магнитный момент наночастиц

$$P = \xi_2 kT / \mu_0 H_{n2}.$$

На рисунке, кривая 2 приведена зависимость от ξ функции Ланжевена $La(\xi)$. По этой кривой для значения $\xi = \xi_2$ можно найти значение $La(\xi_2)$, зная которое можно определить намагниченность насыщения

$$M_{\text{нас}} = M_2 / La(\xi_2)$$

и концентрацию наночастиц

$$n = M_{\text{нас}} / P.$$

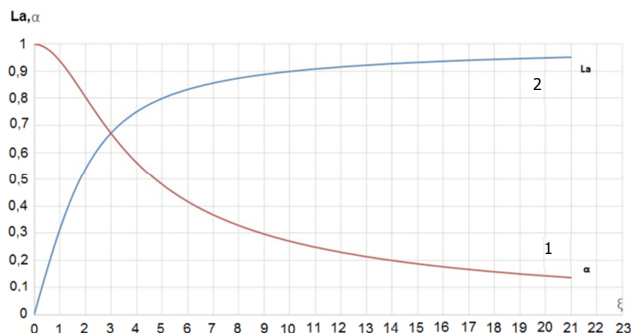


Рисунок. Теоретическая зависимость функции Ланжевена $La(\xi)$ и параметра $\alpha(\xi)$ от параметра Ланжевена ξ .

Проверка предлагаемого метода

Как было сказано ранее, в работе [2] получена кривая намагничивания, содержащая 20 экспериментальных точек, и обычным методом, по наклонам кривой на начальном и на конечном участках определены значения $P \approx 4,4 \cdot 10^{-19} \text{ А} \cdot \text{м}^2$, $n = 1,8 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ и $M_{\text{нас}} \approx 8100 \text{ А/м}$. Используя предлагаемую в настоящей статье методику, найдём P , n и $M_{\text{нас}}$ той же магнитной жидкости по экспериментальным точкам приведённой в [2] кривой намагничивания. Для определения $\alpha_{\text{нач}}$ можно использовать точки № (1-4) в начале кривой намагничивания, для которых выполняется условие $\xi < 1$. Для экспериментальной точки № 4 от начала кривой намагничивания находим намагниченность $M_4 = 1,125 \text{ кА/м}$, напряженность намагничивающего поля $H_{n4} = (B_1/\mu_0) = 2,8 \text{ кА/м}$ и $\alpha_4 = \alpha_{\text{нач}} = M_4/H_{n1} = 0,4$. Для экспериментальной точки № 15 кривой намагничивания, в которой $\xi > 1$ находим $M_{15} = 5,3 \text{ кА/м}$, $H_{n15} = (B_{15}/\mu_0) = 20 \text{ кА/м}$ и $\alpha_{15} = (M_{15}/H_{n15}) = 0,265$. Определяем $\alpha_{15} = \alpha_{15}/\alpha_4 = (M_{15}H_{n4}/M_4H_{n15}) = (5,3 \cdot 2,8 / 1,125 \cdot 20) = 0,66$. По кривой 1 на рисунке настоящей работы для $\alpha_{15} = 0,66$ находим $\xi_{15} = 3,1$. Для значения ξ_{15} по кривой 2 рисунка находим значение функции Ланжевена $La(\xi_{15}) = 0,68$, откуда $M_{\text{нас}} = (M_{15}/La(\xi_{15})) = (5,3/0,68) \approx 7794 \text{ А/м}$. По значениям ξ_{15} и M_{15} определяем магнитный момент $P_{15} = \xi_{15} kT / \mu_0 H_{n15} = 5 \cdot 10^{-19} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ и $n = 1,6 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Учитывая значительный разброс экспериментальных точек на кривой намагничивания, приведённой в работе [2], соответствие результатов, полученных с использованием обычного метода, применённого в работе [2], и метода, применённого в настоящей работе, можно признать удовлетворительным.

Заключение

Из вышеприведённых результатов следует, что предлагаемый экспрессный метод определения намагниченности насыщения и магнитного момента ферромагнитных наночастиц магнитных жидкостей даёт результат, соответствующий получаемому обычным методом по наклону начального и конечного участков кривой намагничивания. Основное преимущество предлагаемого метода в том, что время получения двух точек кривой намагничивания в сотни раз меньше, чем получение всей кривой, требуемое в обычном методе, поэтому его можно применять для измерения скорости седиментации наночастиц при отработке технологии получения устойчивых магнитных жидкостей.

Литература

1. Бирик Е.Е., Матыгулин Б.Я., Райхер Ю.Л. [и др.]. Магнитостатические свойства коллоидов магнетита. // Магнитная гидродинамика. 1973. № 1. С. 68-72.
2. Жерновой А.И., Наумов В.Н., Рудаков Ю.Р. Получение кривой намагничивания дисперсии парамагнитных частиц путем нахождения намагниченности и намагничивающего поля методом ЯМР. // Научное приборостроение. 2009. Т. 19. № 3. С. 57-61.