
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.
НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ**

УДК 541: 537

© А. И. Жерновой, В. Н. Наумов, С. В. Дьяченко

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОНСТАНТЫ КЮРИ СУСПЕНЗИИ СУПЕРПАРАМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ ОТ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В работе экспериментально исследована зависимость константы Кюри суспензии наночастиц магнетита от индукции магнитного поля. Константа Кюри определялась по значениям индукции и напряженности магнитного поля внутри суспензии измеряемым методом ЯМР. Полученное уменьшение константы Кюри с ростом индукции магнитного поля объяснено разбросом размеров наночастиц. В предположении равномерной функции распределения наночастиц по объемам получено удовлетворительное соответствие теоретической и экспериментальной зависимостей константы Кюри от магнитной индукции.

Кл. сл.: суспензия суперпарамагнитных наночастиц, константа Кюри, зависимость от магнитной индукции, влияние разброса размеров наночастиц

ВВЕДЕНИЕ

В ранее опубликованных экспериментальных работах [1–3] статические магнитные восприимчивости суспензий суперпарамагнитных наночастиц находили путем интегрирования значений дифференциальных магнитных восприимчивостей, определяемых электромагнитным методом при нескольких частотах, и экстраполяции к нулевой частоте. При этом было получено, что экспериментальные зависимости статических магнитных восприимчивостей от термодинамической температуры T на начальных участках кривых намагничивания подчиняются закону Кюри—Вейсса. В работе [4] показано, что если намагниченность суспензии J находить по формуле $J = B / \mu_0 - H$, где B и H — индукция и напряженность магнитного поля внутри суспензии, то ее магнитная восприимчивость $\chi = J \mu_0 / B$ на начальном участке кривой намагничивания (при малых B) подчиняется закону Кюри $\chi = C / T$. Это дает возможность, измеряя χ при неизвестной термодинамической температуре T , определять эту температуру по формуле $T = C / \chi$. Константу Кюри C можно найти по формуле $C = T_t \chi_t$, измерив магнитную восприимчивость χ_t при температуре T_t тройной точки воды. Для практического применения метода измерения температуры нужно знать, в каком диапазоне индукций магнитного поля B выполняется закон Кюри, т. е. константа Кюри не зависит от B . Теоретически закон Кюри следует из формулы Ланжевена $J = J_n \text{La}(\xi)$, где La — функция Ланжевена, J_n — намагниченность

насыщения, $\xi = p B / (k T)$ — параметр Ланжевена, p — магнитный момент наночастицы. Отсюда

$$C = J \mu_0 T / B = C_0 3 \text{La}(\xi) / \xi, \quad (1)$$

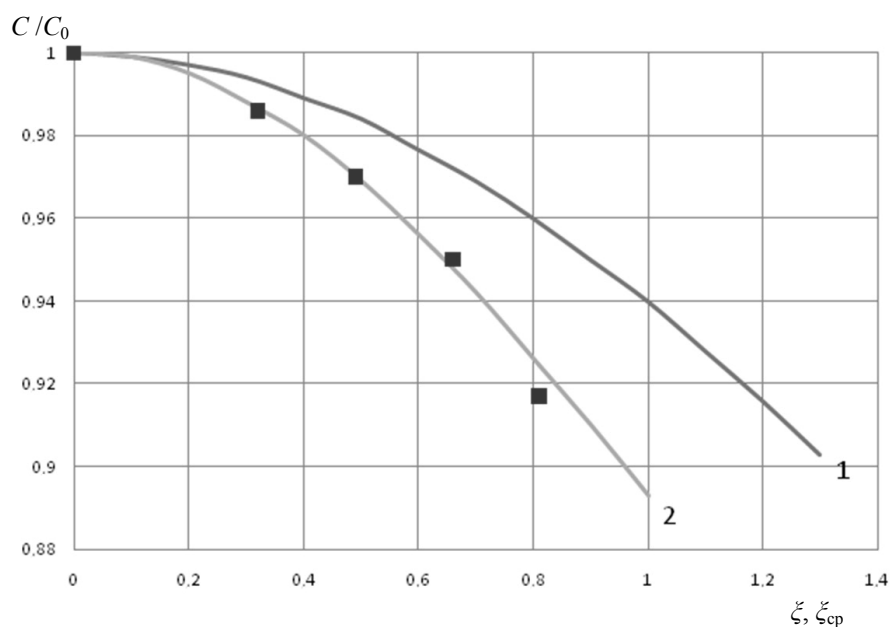
где

$$C_0 = J_n p \mu_0 / (3 k) \quad (2)$$

есть значение C при $\xi \ll 1$. Теоретическая зависимость C / C_0 от ξ , построенная по формуле (1), приведена на рисунке кривой 1. Ее нужно сравнить с экспериментальной зависимостью C от индукции B .

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проведения экспериментальных исследований зависимости константы Кюри от магнитной индукции была применена установка, описанная в работе [5]. Исследуемая суспензия представляла собой коллоидный раствор в воде наночастиц магнетита с весовой концентрацией твердой фазы 14 %. Суспензия помещалась в два одинаковых цилиндрических контейнера диаметром 20 и высотой 45 мм, которые располагались вертикально на расстоянии 4 мм друг от друга во внешнем магнитном поле с индукцией \mathbf{B}_0 , создаваемой системой постоянных магнитов и направленной перпендикулярно плоскости, проходящей через оси обоих контейнеров. В щели между контейнерами и вблизи нормальной \mathbf{B}_0 торцевой поверхности одного из них расположены 1-я и 2-я радиочастотные катушки для измерения методом ЯМР напряженности H и индукции B магнитного поля внутри суспензии.



Теоретические и экспериментальная зависимости константы Кюри C суспензии суперпарамагнитных наночастиц от магнитной индукции. 1 — теоретическая зависимость C от ζ без учета полидисперсности наночастиц; 2 — теоретическая зависимость C от усредненных значений ζ_{cp} с учетом полидисперсности наночастиц. Экспериментальная зависимость представлена экспериментальными точками

Экспериментальные результаты определения константы Кюри C . (ζ_{cp} — усредненное значение параметра Ланжевена)

C, K	171.5	169.1	166.7	162.5	157.3
C / C_0	1	0.986	0.972	0.948	0.917
B, Gc	0	18.5	27.5	38.1	46.4
ζ, ζ_{cp}	0	0.32	0.49	0.66	0.81

Установив при отсутствии контейнеров некоторое значение индукции B_0 , при котором частоты ЯМР, измеренные в обеих катушках, равны $f_0 = \gamma_b \cdot B_0$ ($\gamma_b = 4.25 \cdot 10^7$ — гиромагнитное отношение в единицах Гц/Тл), помещают на свои штатные места контейнеры с исследуемой суспензией и измеряют частоты ЯМР f_1 и f_2 в 1-й и 2-й катушках. По этим частотам находят напряженность $H = \gamma_n \cdot f_1$ и индукцию $B = \gamma_b \cdot f_2$ магнитного поля внутри суспензии ($\gamma_n = 53.4$ — гиромагнитное отношение в единицах Гц·м/А). Константу Кюри определяют по формуле $C = (1 - f_1 / f_2) T$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В таблице приведены полученные экспериментально значения константы Кюри C при нескольких индукциях магнитного поля B , определяемых по частотам f_2 . Значение $C = C_0$ найдено усреднением 7 значений C , полученных при $B < 10$ Гс. Для

сравнения экспериментальных результатов, приведенных в таблице, с теоретической кривой 1 на рисунке, нужно связать значения индукций B со значениями параметра Ланжевена $\zeta = p B / (k T)$. Для этого необходимо знать значение магнитного момента наночастиц p . Магнитный момент p можно найти из формулы (2), подставив в нее экспериментальное значение $C_0 = 171.6$ К из таблицы и намагниченность насыщения $J_n = 8100$ А/м, полученную в работе [5]. В результате получается $p = 7 \cdot 10^{-19}$ Дж/Тл. При таком значении магнитного момента для каждой экспериментальной точки, приведенной в таблице, находим параметры Ланжевена ζ , приведенные в 4-й строке таблицы. С использованием этих параметров и значений C , приведенных в таблице, получаем экспериментальные точки, отмеченные в виде квадратиков на рисунке. Можно убедиться, что экспериментальные точки не ложатся на теоретическую кривую 1.

Причина может быть в распределении наночастиц по размерам, приводящим к различию их

магнитных моментов. Приняв эту гипотезу, введем функцию распределения наночастиц по параметрам Ланжевена ξ — $f(\xi)$ — и напишем выражение для намагниченности суспензии с учетом

этого распределения : $J = J_n \int_0^{\infty} \text{La}(\xi) f(\xi) d\xi$.

Для оценки константы Кюри $C = J \mu_0 T / B$ примем распределение наночастиц по значениям их магнитных моментов равномерным от 0 до максимального значения p_m . При этом среднее значение магнитного момента наночастицы $p_{cp} = p_m / 2$, распределение наночастиц по параметрам ξ равномерно от $\xi = 0$ до максимального значения $\xi_m = p_m B / (k T) = 2p_{cp} B / (k T)$ и функция распределения $f(\xi) = 1 / \xi_m$. Произведя интегрирование, получаем:

$$C = (J_n \mu_0 T / B \xi_m) \ln(\text{Sh}(\xi_m) / \xi_m) = (6C_0 / \xi_m^2) \ln(\text{Sh}(\xi_m) / \xi_m), \quad (3)$$

где $C_0 = J_n \mu_0 p_m / (6k) = J_n \mu_0 p_{cp} / (3k)$, что с учетом равенства $p = p_{cp}$ совпадает с (2). Теоретическая зависимость C/C_0 от усредненного параметра Ланжевена $\xi_{cp} = p_{cp} B / (k T) = \xi_m / 2$, построенная по выражению (3), приведена на рисунке кривой 2. Можно убедиться, что приведенные на рисунке экспериментальные точки лежат на кривой 2, построенной с учетом полидисперсности наночастиц, из чего можно сделать вывод, что скорость уменьшения константы Кюри с ростом B зависит от полидисперсности наночастиц. Это можно использовать для оценки полидисперсности суперпарамагнитных наночастиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных результатов можно сделать следующее заключение.

1. Для уменьшения зависимости константы Кюри от магнитной индукции нужно применять суспензию суперпарамагнитных наночастиц с близкими размерами.

2. По зависимости константы Кюри от магнитной индукции можно оценивать функцию распределения суперпарамагнитных наночастиц по размерам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диканский Ю.И. // Магнитная гидродинамика. 1982. № 3. С. 33–36.
2. Варламов Ю.Д. // Теплофизические свойства индивидуальных веществ и растворов (Сб.). Новосибирск, 1986. С. 84–100.
3. Блум Э.Я., Майоров М.М., Цербер А.Б. Магнитные жидкости. Рига: Зинатне, 1989. 386 с.
4. Жерновой А.И., Рудаков Ю.Р., Дьяченко С.В. // Научное приборостроение. 2012. Т. 22, № 1. С. 52–54.
5. Жерновой А.И., Наумов В.Н., Рудаков Ю.Р. // Научное приборостроение. 2009. Т. 19, № 3. С. 57–61.

СПбГТИ (ТУ), г. Санкт-Петербург

Контакты: Жерновой Александр Иванович,
azhspsb@rambler.ru

Материал поступил в редакцию 26.03.2012.

RESEARCH OF DEPENDENCE OF THE CURIE CONSTANT OF SUPERPARAMAGNETIC NANOPARTICLES SUSPENSION ON MAGNETIC FIELD INDUCTION

A. I. Zhernovoy, V. N. Naumov, S. V. Diyachenko

Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)

Dependence the Curie constant of magnetite nanoparticles suspension on magnetic field induction is experimentally investigated in the work. The Curie constant was defined by values of an induction and intensity of magnetic field in the suspension measured by a method of nuclear magnetic resonance. The received reduction of the Curie constant with growth of magnetic field induction is explained by disorder of nanoparticle size. In the assumption of uniform function of nanoparticles distribution on volumes satisfactory compliance of theoretical and experimental dependences of the Curie constant on magnetic induction is obtained.

Keywords: suspension superparamagnetic nanoparticles, Curie constant, dependence on magnetic induction, influence of disorder of nanoparticles sizes