

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 53.082.79

О ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЕРРОЖИДКОСТЕЙ ЯДЕРНО-МАГНИТНЫМ МАГНИТОМЕТРОМ С ТЕКУЩИМ ОБРАЗЦОМ

© 2020 г. В. В. Давыдов^{a, b, *}, В. И. Дудкин^c, Н. С. Мязин^a, Р. В. Давыдов^a

^aСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 195251 Российская Федерация

^bВсероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии,
ул. Институт, вл. 5, р.п. Большие Вяезы, Московской обл., 143050 Российская Федерация

^cСанкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
пр. Большевиков, 22, Санкт-Петербург, 193232 Российская Федерация

*E-mail: davydov_vadim66@mail.ru

Поступила в редакцию 26.12.2018 г.

После доработки 04.03.2019 г.

Принята к публикации 25.03.2019 г.

Рассмотрена новая методика, использующая высокочувствительный ядерно-магнитный магнитометр с текущей водой для определения магнитной восприимчивости и константы Кюри магнитных жидкостей с погрешностью не хуже 1.0%. Показано, что в диапазоне температур 283...323 К, при которых применяются феррофлюидные ячейки, закон Кюри выполняется, дальнейшее увеличение температуры ферромагнитной жидкости приводит к незначительному изменению константы Кюри. Представлены результаты экспериментальных исследований.

DOI: 10.31857/S0033849420050010

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время постоянно повышается интерес к применению магнитных жидкостей (феррожидкостей) в различных измерительных устройствах, системах контроля, медицине и т.д. [1–6]. В ряде случаев (например, в датчиках угла наклона, акселерометрах, термомагнитных системах охлаждения термоядерных реакторов и т.д.) требуется знание намагниченности насыщения M_n , зависимости магнитной восприимчивости χ_k от температуры T и константы Кюри C этого материала [4–9]. Для измерения C и χ_k с погрешностью не выше 1% разработано большое число методов [1, 5, 8, 10, 11], однако с некоторыми недостатками. Один из них в случае конкретного прибора [5, 6] связан с тем, что размеры некоторых феррофлюидных ячеек не соответствуют размерам его кювет, в которых размещается ферромагнитная жидкость во время измерений.

В различных практических задачах [4, 12] необходимо установить диапазон изменения индукции магнитного поля B_0 , в котором выполняется закон Кюри [13–15]:

$$\chi = C/T. \quad (1)$$

В работах [5, 6] было обосновано необходимое условие (в предположении близких размеров наночастиц), выполнение которого позволяет при-

менять для расчета константы Кюри следующее соотношение:

$$C = nP^2\mu_0/3k$$

(n – концентрация магнитных наночастиц, P – их магнитный момент), полученное из формулы Ланжевена [14]. Это дает возможность проводить теоретическую оценку значений χ_k с использованием (1).

Для изготовления большинства феррофлюидных ячеек применяются различные феррожидкости, но данные о растворах (например, о концентрации n) со временем могут быть утрачены. Поэтому разработка надежного и универсального метода измерения параметров ферромагнитной жидкости, размещенной в закрытой феррофлюидной ячейке, является актуальной задачей. Одним из возможных ее решений может быть разработанный нами метод с применением высокочувствительного ядерно-магнитного магнитометра с текущим образцом.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Разработанные нами ранее конструкции магнитометров на основе явления ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в текущей жидкости показали высокую точность и надежность при измерении

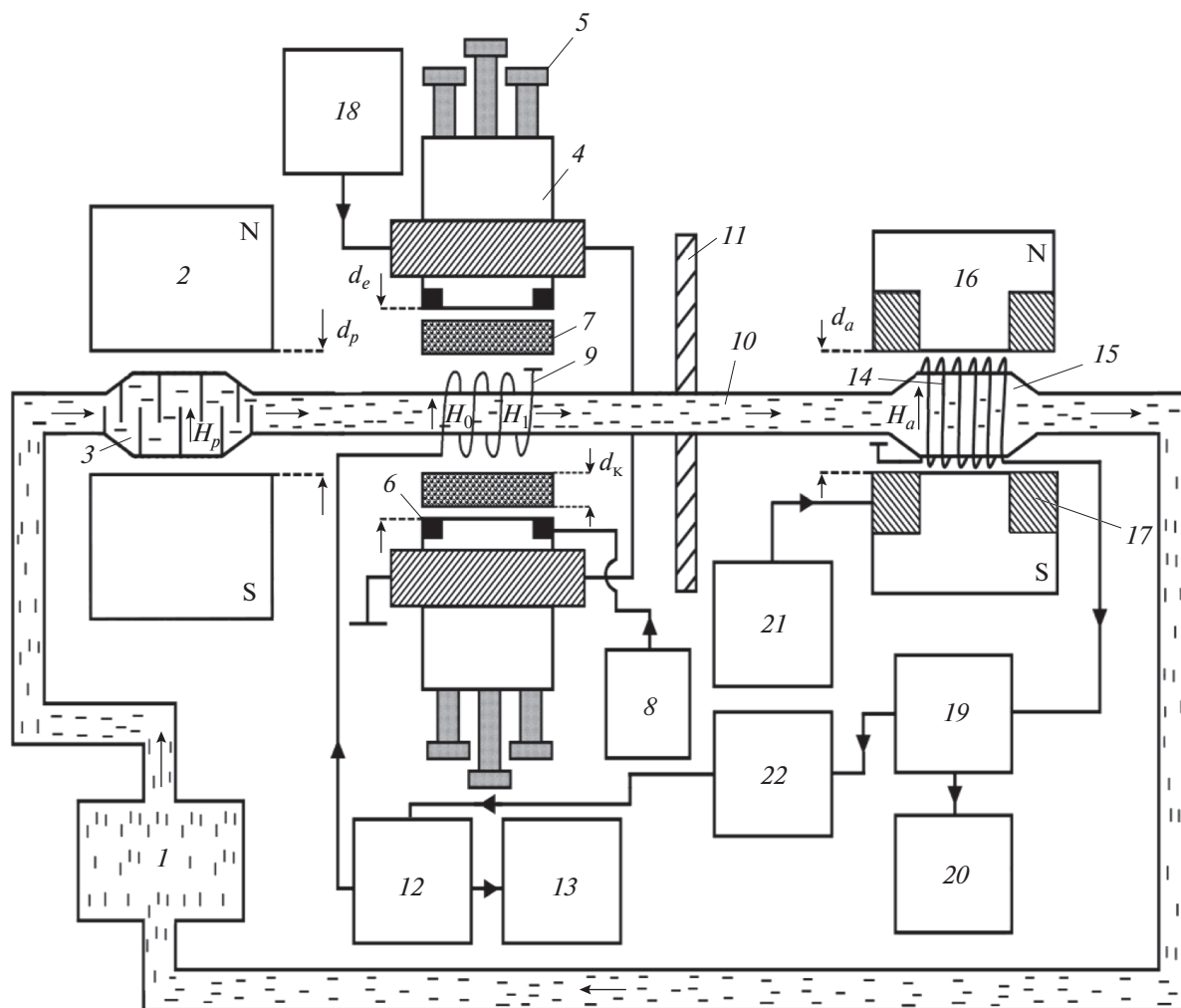


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: 1 – помпа; 2 – магнит-поляризатор; 3 – сосуд-поляризатор; 4 – электромагнит; 5 – регулировочные винты; 6 – корректирующие катушки; 7 – контейнер с коллоидным раствором; 8 – источник питания корректирующих катушек; 9 – катушка нутации; 10 – соединительный участок трубопровода; 11 – магнитный экран; 12 – радиочастотный генератор; 13 – частотомер; 14 – катушка регистрации; 15 – сосуд-анализатор; 16 – магнит-анализатор; 17 – катушки модуляции поля магнита-анализатора; 18 – источник питания электромагнита; 19 – устройство регистрации сигнала ЯМР; 20 – осциллограф; 21 – радиочастотный генератор; 22 – устройство управления и обработки сигнала ЯМР.

магнитных полей [15–18]. На рис. 1 представлена схема созданной нами экспериментальной установки для измерения χ_k магнитной жидкости с использованием ЯМР-магнитометра на текущей воде. Дистиллированная вода из сосуда поляризатора, расположенного в зазоре магнита-поляризатора 2, поступает по соединительному участку трубопровода в катушку нутации 9. Она размещена в электромагните, индукция B_0 которого могла изменяться от 0.0081 до 1.4072 Тл. Степень неоднородности поля была не хуже 10^{-3} см^{-1} при расстоянии между полюсами d_e , которое могло изменяться от 40 до 160 мм (диаметр полюсов $d_n = 150 \text{ мм}$). Для управления степенью неоднородности магнитного поля в области между полюсами применялись регулировочные винты 5 и корректирующие катушки 6.

В катушке нутации 9 под действием радиочастотного поля H_1 происходит изменение ориентации вектора намагниченности M_p ядерных моментов протонов текущей жидкости относительно направления постоянного магнитного поля H_p [1, 16–19]. После прохождения жидкостью соединительного участка трубопровода 10 это изменение фиксируется катушкой регистрации сигнала ЯМР 14 с использованием модуляционной методики [17–19]. Амплитуда U_s регистрируемого сигнала ЯМР достигает своего максимального значения, когда частота f_n радиочастотного поля (нутации) совпадает с частотой f_0 :

$$f_0 = \gamma B_0, \quad (2)$$

где γ – гиромагнитное отношение ядер.

Точность измерения резонансной частоты $f_n = f_0$, по которой в соответствии с (2) определяется значение B_0 , зависит от величины отношения сигнал/шум (С/Ш), регистрируемого сигнала ЯМР и ширины линии нутации Δf_n (неоднородности магнитного поля в зоне размещения катушки нутации) [17–20]. Длина катушки нутации l_n составляла 3 мм, диаметр $d_n = 6$ мм. Для размещения между полюсами электромагнита феррофлюидных ячеек контейнеров 7с ферромагнитной жидкостью (см. рис. 1), предварительно разогретыми до определенной температуры, в данной работе была применена специальная конструкция термостата из немагнитного материала с низкой теплопроводностью. Верхняя и нижняя грани конструкции термостата плотно соприкасались с полюсами магнита. При изменении расстояний между полюсами магнита эти грани могли перемещаться (расстояние между ними изменяется) таким образом, чтобы держатель ячейки был зафиксирован полюсами магнита. Между гранями были установлены две специальные подставки для размещения на них феррофлюидных ячеек, которые могли перемещаться вдоль оси соединяющей полюса магнитной системы. Перемещение подставок позволяло обеспечить симметричное расположение образца толщиной d_k (см. рис. 1) относительно катушки нутации 9.

Необходимо отметить, что использование описанной конструкции между феррофлюидными ячейками, полюсами магнитной системы и катушкой нутации позволяет установить термоизолирующие прокладки, изготовленные из высокотемпературных керамических волокон толщиной 3 мм [21]. Эксперименты показали, что использование прокладок позволяет надежно изолировать магнитную систему от разогретого образца. Например, для случая применения кювет цилиндрической формы с диаметром основания $d_{\text{ц}} = 150$ мм, высотой $h_{\text{ц}} = 30$ мм, толщиной стенок контейнера 1 мм изменение температура ΔT_n между полюсами магнита в зоне размещения катушки нутации составило примерно 1.5 град. Для контроля температуры использовался стандартный термометрический датчик и инфракрасный дистанционный измеритель температуры Testo 845 (фирма Testo AG, Германия).

Кюветы с ферромагнитной жидкостью (феррофлюидная ячейка) в данной конструкции были расположены так, чтобы их основания были параллельны полюсам электромагнита, а также оси катушки нутации 9, по которой направлено поле H_1 (см. рис. 1). Центры полюсов магнита, оснований контейнеров и катушки нутации находились на одной прямой.

При размещении кювет с ферромагнитной жидкостью в электромагните магнитное поле в зоне расположения катушки нутации изменяло

Таблица 1. Значения ширины линии нутации Δf_n , при которых измеряются* резонансные частоты f_0 и f_0^M для различных величин d_k

d_k , мм	f_k , Гц	Δf_n , Гц
0	5406147	291
0.5	5459051	308
1.0	5516408	332
2.0	5641218	352
3.0	5747294	378
4.0	5868211	402
6.0	6134297	446

* Условия проведения измерений: контейнер коллоидного раствора в воде однодоменных наночастиц гематита с объемной концентрацией 0.054 с ПАВ – гидроксид тетраметиламмония – при $T = 289.2$ К, $B_0 = 0.127$ Тл, $H_1 = 11.26$ А/м, $f_0 = 5406147$ Гц.

свое значение на некоторую величину δB , которая зависела как от d_k , так и от χ_k . Регулируемыми винтами и корректирующими катушками неоднородность магнитного поля в этой зоне компенсировалась по минимуму ширины линии нутации $\Delta f_n = f_2 - f_1$. На рис. 2 представлена (линии нутации) зависимость амплитуды U_s регистрируемого сигнала ЯМР от частоты f_n при размещении между полюсами электромагнита кювет с различным значением d_k ферромагнитной жидкости. Кювета представляла собой цилиндр с $d_{\text{ц}} = 150$ мм, $h_{\text{ц}} = 10$ мм, толщина стенок – 1 мм.

В табл. 1 представлены измеренные значения Δf_n . Как видим, погрешности измерения резонансных частот нутации f_n , равных f_0 и f_0^M , (индекс м относится к магнитной жидкости) которые используются для определения χ_k , одинаковы. Измеряя резонансные частоты нутации в зоне размещения катушки нутации f_0 и f_0^M , можно определить величину δB . Изменение индукции магнитного поля в зазоре между полюсами магнитной системы 4 было рассчитано с использованием методики, разработанной для П-образных одноосвязных магнитных систем [22–24].

Для феррофлюидной ячейки, которая представляет собой контейнер с диаметром $d_{\text{ц}} = 150$ мм, с применением методики, рассмотренной в [22–24], была получена зависимость изменения δB_m в зоне размещения катушки нутации в зависимости от χ_k и d_k ферромагнитной жидкости. Это позволило определить магнитную восприим-

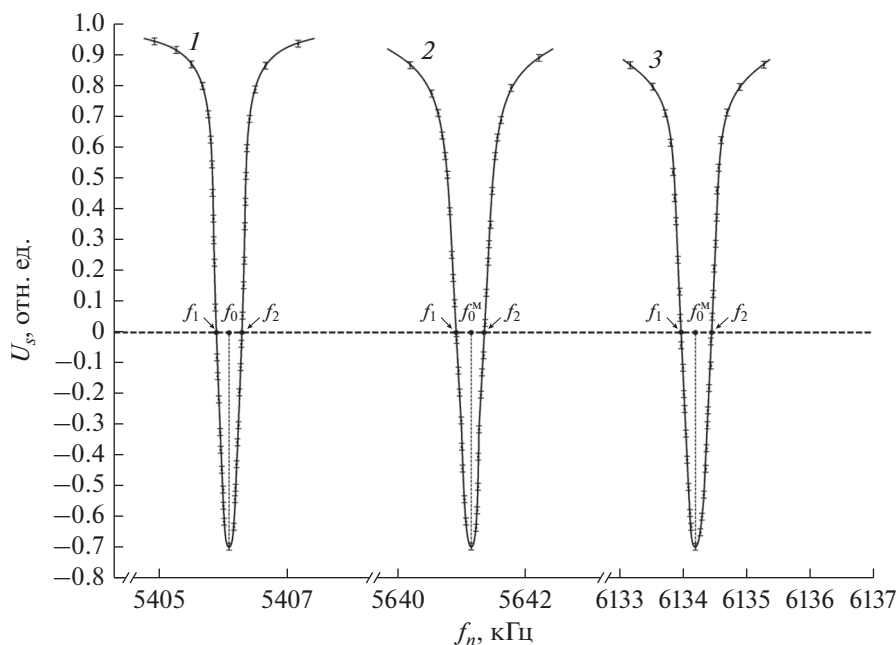


Рис. 2. Форма линии нутации регистрируемого сигнала ЯМР при размещении между полюсами электромагнита двух контейнеров с различной толщиной слоя d_k коллоидного раствора в воде однодоменных наночастиц гематита с объемной концентрацией 0.054 с ПАВ – гидроксид тетраметиламмония при температуре $T = 289.2$ К, $H_1 = 11.26$ А/м; $d_k = 0$ (1), 2 (2), 6 мм (3).

чивость ферромагнитной жидкости χ_k с помощью следующего соотношения:

$$\chi_k = (f_0^M - f_0) / (f_0 - f_0^M(1 - 2d_k/d_e)). \quad (3)$$

Экспериментами было установлено, что нарушение симметричного расположения контейнеров по отношению к полюсам электромагнита и оси катушки нутации приводит к изменению значения f_0^M , а также к уширению линии нутации (Δf_n увеличивается), что ведет к повышению погрешности измерения f_0^M . В случае смещения центров основания контейнеров по отношению к прямой, проходящей через центры полюсов магнита перпендикулярно их плоскостям, происходит значительное уширение линии нутации по сравнению с ранее рассмотренным случаем (полной центровки контейнеров и полюсов). Кроме того, изменяется само значение f_0^M , которое изменяется с другой погрешностью по сравнению с f_0 .

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости обратной магнитной восприимчивости χ_k^{-1} от температуры для двух магнитных жидкостей. Значения χ_k на графиках 1 и 2 получены с использованием (3) по измерениям двух резонансных

частот магнитного поля в зоне размещения катушки нутации. Измерения проводились при индукции магнитного поля $B_0 = 238$ мТл с неоднородностью 10^{-4} см $^{-1}$. Ячейки с ферромагнитными жидкостями перед измерением χ_k хранились в неподвижном состоянии более 10 сут (имитация длительного хранения).

При проведении измерения f_0 и f_0^M температура в области размещения образца могла изменяться в пределах 283...363 К. При $T = 293.1$ К по измеренным значениям χ_k для двух феррожидкостей (водный раствор однодоменных наночастиц магнетита размером 12 нм с объемной концентрацией 0.027 с ПАВ – олеиновая кислота, и гематита размером 14 нм с объемной концентрацией 0.054 с ПАВ – гидроксид тетраметиламмония) были определены константы Кюри C , которые составили 135.1 и 188.6 К соответственно. Сравнение констант Кюри, полученных нами и определенных в [5, 6, 9] для веществ с теми же параметрами, а также рассчитанными с использованием формул в [14, 15] для определения χ_k , подтвердили достоверность полученных результатов и корректность предложенного метода определения χ_k .

Температура ферромагнитной жидкости после перемещения феррофлюидной ячейки из области нагрева в межполюсное пространство магнитной системы контролировалась инфракрасным дистанционным измерителем температуры Testo 845 по

торцу феррофлюидной ячейки (чувствительность 0.1 К). Также с его помощью контролировалась температура ферромагнитной жидкости в момент проведения измерения резонансной частоты магнитного поля.

Проведенные эксперименты показали, что при нагревании ферромагнитных жидкостей в ячейке до температуры порядка 323 К происходит изменение угла наклона зависимостей χ_k^{-1} от T , который при дальнейшем разогреве жидкости не изменяется (см. рис. 3а). Для того чтобы показать изменение угла наклона на рис. 3а построены продолженные прямые. При интенсивном перемешивании ферромагнитной жидкости из осадка поднимаются более крупные агломераты, которые не разрушаются при разогреве феррофлюидной ячейки в исследуемом диапазоне температур, так как их энергия связи порядка 0.03 эВ [15]. Поэтому изменение угла наклона зависимостей χ_k^{-1} от T в этом случае в диапазоне температуры разогрева феррофлюидной ячейки от 283 до 363 К не происходит (рис. 3б).

Для подтверждения обоснованности предложенной нами методики измерения χ_k было проведено сравнение результатов, полученных нами с использованием разработанной экспериментальной установки, и результатов измерения χ_k на промышленных приборах высокого класса. Измерения χ_k образцов ферромагнитной жидкости, использованных нами для изготовления феррофлюидных ячеек, выполнялись на ЭПР спектрометре "ER-100M" (компании Bruker), в дополнительную комплектацию которого входит система для измерения динамической и статической магнитной восприимчивости на частотах 0.1...5.0 МГц и вибрационном магнитометре VSM model 7410 (компания Lake Shore Cryotronics Inc.). При измерении значений χ_k температура образцов ферромагнитной жидкости, изготовленных из гематита и магнетита, изменялась в диапазоне 283...363 К. Результаты сравнения выполненных измерений χ_k представлены в табл. 2.

Кроме того, предлагаемая нами методика определения χ_k была проверена на еще двух образцах также при $T = 283...363$ К: 1) образец на основе ранее используемого водного раствора однодоменных частиц магнетита с добавлением в него наночастиц самария размером 14 нм, 2) образец на основе гематита с добавлением в него наночастиц кобальта размером 14 нм; в качестве ПАВ использовалась лимонная кислота. Эти образцы также были исследованы на низкочастотном ЭПР-спектрометре ER-100M (компании Bruker) с криостатом для проведения измерений в диапазоне температур 213...400 К и на вибрационном магнитометре VSM model 7410 (компания Lake Shore Cryotronics Inc.). Результаты сравне-

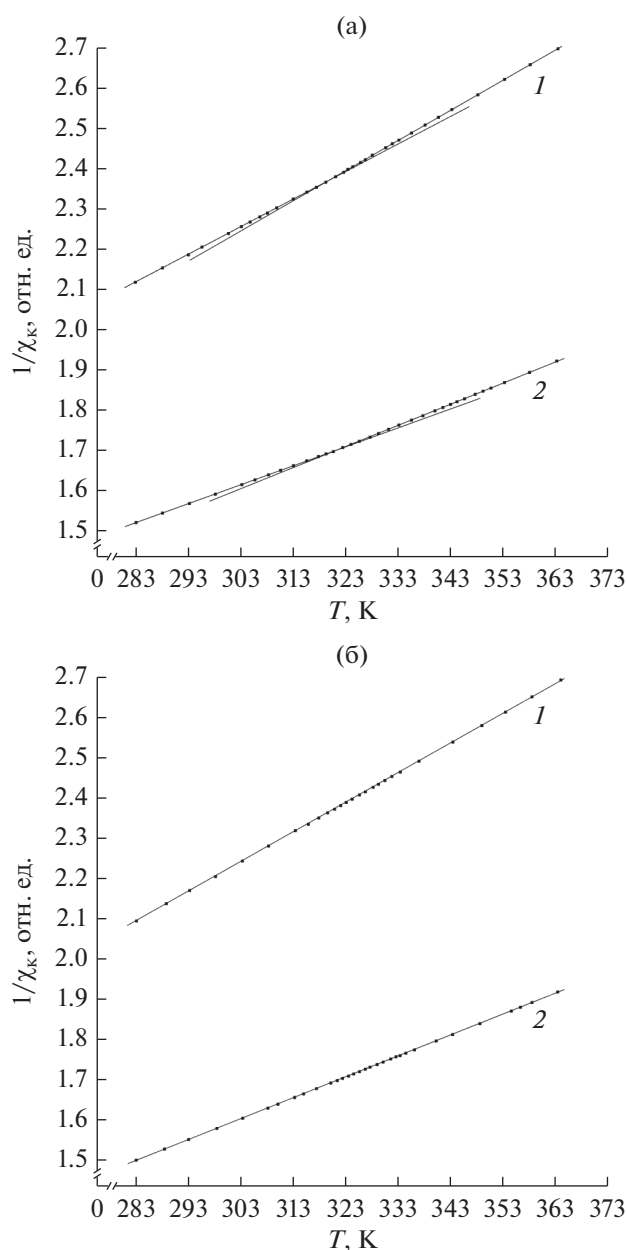


Рис. 3. Зависимость магнитной восприимчивости χ_k от температуры T коллоидного раствора в случае длительного хранения феррофлюидной ячейки (а) и после его интенсивного перемешивания (б); кривые 1 – раствор в воде однодоменных наночастиц магнетита с объемной концентрацией 0.027 с ПАВ – олеиновая кислота, кривые 2 – органический растворитель гематит с объемной концентрацией 0.054 с ПАВ – гидроксид тетраметиламмония.

ния выполненных измерений χ_k на этих образцах представлены в табл. 3.

Анализ полученных результатов на четырех образцах (см. табл. 2 и 3) показал, что значения χ_k , измеренные различными методами, совпадают в пределах погрешности измерения.

Таблица 2. Значения магнитной восприимчивости χ для ферромагнитных жидкостей, изготовленных из наночастиц магнетита (М) и гематита (Г) от температуры T , измеренные на экспериментальной установке и промышленными приборами

T , К	Ядерно-магнитный магнитометр на текущей жидкости	ЭПР-спектрометр "ER-100M" (компания Bruker)	Вибрационный магнитометр VSM model 7410 (компания Lake Shore Cryotronics Inc.)
283.2	М. 2.0957 ± 0.0158 Г. 1.5012 ± 0.0116	М. 2.0898 ± 0.0104 Г. 1.4974 ± 0.0075	М. 2.0892 ± 0.0065 Г. 1.4967 ± 0.0047
288.3	М. 2.1334 ± 0.0160 Г. 1.5021 ± 0.0117	М. 2.1278 ± 0.0105 Г. 1.4989 ± 0.0076	М. 2.1271 ± 0.0065 Г. 1.4983 ± 0.0047
293.1	М. 2.1695 ± 0.0162 Г. 1.5540 ± 0.0117	М. 2.1648 ± 0.0106 Г. 1.5509 ± 0.0077	М. 2.1641 ± 0.0066 Г. 1.5502 ± 0.0048
298.2	М. 2.2072 ± 0.0165 Г. 1.5844 ± 0.0118	М. 2.2027 ± 0.0107 Г. 1.5815 ± 0.0079	М. 2.2021 ± 0.0066 Г. 1.5804 ± 0.0049
303.3	М. 2.2450 ± 0.0168 Г. 1.6081 ± 0.0119	М. 2.2408 ± 0.0109 Г. 1.6039 ± 0.0080	М. 2.2402 ± 0.0067 Г. 1.6030 ± 0.0049
308.1	М. 2.2805 ± 0.0170 Г. 1.6336 ± 0.0122	М. 2.2761 ± 0.0113 Г. 1.6297 ± 0.0081	М. 2.2754 ± 0.0068 Г. 1.6291 ± 0.0049
313.2	М. 2.3182 ± 0.0173 Г. 1.6606 ± 0.0124	М. 2.3145 ± 0.0115 Г. 1.6552 ± 0.0082	М. 2.3137 ± 0.0069 Г. 1.6543 ± 0.0050
317.5	М. 2.3501 ± 0.0176 Г. 1.6834 ± 0.0126	М. 2.3465 ± 0.0117 Г. 1.6786 ± 0.0083	М. 2.3457 ± 0.0070 Г. 1.6777 ± 0.0050
323.3	М. 2.3930 ± 0.0179 Г. 1.7142 ± 0.0128	М. 2.3878 ± 0.0119 Г. 1.7077 ± 0.0085	М. 2.3867 ± 0.0071 Г. 1.7059 ± 0.0051
328.1	М. 2.4285 ± 0.0182 Г. 1.7396 ± 0.0130	М. 2.4237 ± 0.0121 Г. 1.7349 ± 0.0087	М. 2.4227 ± 0.0072 Г. 1.7340 ± 0.0052
333.1	М. 2.4655 ± 0.0185 Г. 1.7661 ± 0.0132	М. 2.4609 ± 0.0123 Г. 1.7619 ± 0.0088	М. 2.4601 ± 0.0173 Г. 1.7608 ± 0.0053
338.1	М. 2.5025 ± 0.0193 Г. 1.7926 ± 0.0138	М. 2.4975 ± 0.0125 Г. 1.7877 ± 0.0089	М. 2.4966 ± 0.0075 Г. 1.7863 ± 0.0054
343.1	М. 2.5396 ± 0.0199 Г. 1.8191 ± 0.0143	М. 2.5345 ± 0.0126 Г. 1.8146 ± 0.0091	М. 2.5336 ± 0.0076 Г. 1.8134 ± 0.0055
348.4	М. 2.5788 ± 0.0206 Г. 1.8472 ± 0.0147	М. 2.5742 ± 0.0128 Г. 1.8431 ± 0.0092	М. 2.5734 ± 0.0077 Г. 1.8422 ± 0.0056
353.1	М. 2.6136 ± 0.0209 Г. 1.8722 ± 0.0149	М. 2.6083 ± 0.0130 Г. 1.8681 ± 0.0093	М. 2.6071 ± 0.0078 Г. 1.8669 ± 0.0057
358.2	М. 2.6513 ± 0.0212 Г. 1.8992 ± 0.0151	М. 2.6466 ± 0.0132 Г. 1.8922 ± 0.0095	М. 2.6453 ± 0.0079 Г. 1.8910 ± 0.0057
363.2	М. 2.6901 ± 0.0215 Г. 1.9252 ± 0.0154	М. 2.6857 ± 0.0134 Г. 1.9209 ± 0.0096	М. 2.6844 ± 0.0080 Г. 1.9192 ± 0.0058

Таблица 3. Значения магнитной восприимчивости χ от температуры T образцов ферромагнитных жидкостей, изготовленных из наночастиц магнетита и самария (МС) и гематита и кобальта (ГК), измеренные на экспериментальной установке и промышленными приборами

T, K	Ядерно-магнитный магнитометр на текущей жидкости	ЭПР-спектрометр "ER-100M" (компания BRUKER)	Вибрационный магнитометр VSM model 7410 (компания Lake Shore Cryotronics Inc.)
283.1	МС. 1.2870 ± 0.0096 ГК. 1.1607 ± 0.0087	МС. 1.2842 ± 0.0064 ГК. 1.1579 ± 0.0056	МС. 1.2836 ± 0.0038 ГК. 1.1572 ± 0.0035
288.1	МС. 1.3098 ± 0.0098 ГК. 1.1812 ± 0.0088	МС. 1.3067 ± 0.0065 ГК. 1.1782 ± 0.0059	МС. 1.3060 ± 0.0039 ГК. 1.1774 ± 0.0035
293.2	МС. 1.3452 ± 0.0101 ГК. 1.2021 ± 0.0090	МС. 1.3419 ± 0.0067 ГК. 1.1989 ± 0.0060	МС. 1.3411 ± 0.0040 ГК. 1.1981 ± 0.0036
298.1	МС. 1.3553 ± 0.0102 ГК. 1.2221 ± 0.0092	МС. 1.3521 ± 0.0068 ГК. 1.2189 ± 0.0061	МС. 1.3516 ± 0.0041 ГК. 1.2181 ± 0.0036
303.0	МС. 1.3781 ± 0.0103 ГК. 1.2423 ± 0.0093	МС. 1.3750 ± 0.0069 ГК. 1.2396 ± 0.0062	МС. 1.3743 ± 0.0041 ГК. 1.2390 ± 0.0037
308.3	МС. 1.4016 ± 0.0105 ГК. 1.2640 ± 0.0095	МС. 1.3984 ± 0.0070 ГК. 1.2609 ± 0.0063	МС. 1.3978 ± 0.0042 ГК. 1.2602 ± 0.0038
313.3	МС. 1.4243 ± 0.0107 ГК. 1.2845 ± 0.0096	МС. 1.4211 ± 0.0071 ГК. 1.2813 ± 0.0064	МС. 1.4205 ± 0.0043 ГК. 1.2806 ± 0.0039
317.1	МС. 1.4416 ± 0.0108 ГК. 1.3001 ± 0.0098	МС. 1.4383 ± 0.0072 ГК. 1.2969 ± 0.0065	МС. 1.4376 ± 0.0043 ГК. 1.2962 ± 0.0039
323.2	МС. 1.4693 ± 0.0110 ГК. 1.3251 ± 0.0099	МС. 1.4661 ± 0.0073 ГК. 1.3209 ± 0.0066	МС. 1.4653 ± 0.0044 ГК. 1.3201 ± 0.0040
328.4	МС. 1.4929 ± 0.0111 ГК. 1.3464 ± 0.0103	МС. 1.4897 ± 0.0074 ГК. 1.3430 ± 0.0067	МС. 1.4889 ± 0.0044 ГК. 1.3422 ± 0.0041
333.2	МС. 1.5148 ± 0.0114 ГК. 1.3660 ± 0.0106	МС. 1.5114 ± 0.0075 ГК. 1.3627 ± 0.0068	МС. 1.5104 ± 0.0045 ГК. 1.3620 ± 0.0042
338.2	МС. 1.5375 ± 0.0117 ГК. 1.3866 ± 0.0109	МС. 1.5340 ± 0.0076 ГК. 1.3833 ± 0.0069	МС. 1.5333 ± 0.0046 ГК. 1.3825 ± 0.0042
343.3	МС. 1.5607 ± 0.0122 ГК. 1.4075 ± 0.0112	МС. 1.5574 ± 0.0078 ГК. 1.4039 ± 0.0070	МС. 1.5567 ± 0.0047 ГК. 1.4033 ± 0.0043
348.0	МС. 1.5821 ± 0.0126 ГК. 1.4267 ± 0.0114	МС. 1.5774 ± 0.0079 ГК. 1.4230 ± 0.0071	МС. 1.5769 ± 0.0047 ГК. 1.4222 ± 0.0043
353.3	МС. 1.6062 ± 0.0128 ГК. 1.4485 ± 0.0116	МС. 1.6028 ± 0.0080 ГК. 1.4451 ± 0.0072	МС. 1.6022 ± 0.0048 ГК. 1.4445 ± 0.0044
358.1	МС. 1.6280 ± 0.0130 ГК. 1.4681 ± 0.0117	МС. 1.6263 ± 0.0081 ГК. 1.4646 ± 0.0073	МС. 1.6254 ± 0.0049 ГК. 1.4639 ± 0.0044
363.3	МС. 1.6517 ± 0.0132 ГК. 1.4894 ± 0.0119	МС. 1.6481 ± 0.0082 ГК. 1.4858 ± 0.0074	МС. 1.6474 ± 0.0050 ГК. 1.4850 ± 0.0045

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные результаты показывают, что в диапазоне изменения температур от 283 до 363 К разработанный нами метод позволяет определять χ_k и константу Кюри ферромагнитной жидкости внутри феррофлюидной ячейки с погрешностью не выше 1.0% даже при образцах малого размера и слабом изменении вносимой образцом неоднородности магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дудкин В.И., Пахомов Л.Н. Квантовая электроника. СПб.: Политехн. Ун-т, 2012.
2. Nepomnyashchaya E.K., Prokofiev A.V., Velichko E.N. et al. // J. Magnetism and Magnetic Mater. V. 431. P. 24.
3. Nepomnyashchaya E.K., Velichko E.N., Pleshakov I.V. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 841. № 1. P. 012020.
4. Logunov S.E., Koshkin A. Yu., Davydov V.V., Petrov A.A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 741. № 1. P. 012092.
5. Жерновой А.И., Дьяченко С.И. // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 1. С. 119.
6. Жерновой А.И., Комлев А.А., Дьяченко С.В. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 2. С. 146.
7. Ryzhov V.A., Pleshakov I.V., Nechitailov A.A. et al. // Appl. Magnetic Resonance. 2014. V. 45. № 4. P. 339.
8. Pshenichnikov A.F., Lebedev A.V. // Colloid J. 2005. V. 67. № 2. P. 189.
9. Agruzov P.M., Pleshakov I.V., Bibik E.E. et al. // Europhys. Lett. 2015. V. 111. № 5. P. 57003-5.
10. Кабардина С.И., Шеффер Н.И. Измерения физических величин. М.: Бином, 2009.
11. Чертов А.Г. Физические величины. М.: Высшая школа, 1990.
12. Logunov S.E., Davydov V.V., Vysoczky M.G., Mazing M.S. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1038. № 1. P. 012093.
13. Agruzov P.M., Pleshakov I.V., Bibik E.E., Shamray A.V. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. № 7. P. 071108-4.
14. Леше А. Ядерная индукция. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
15. Давыдов В.В., Дудкин В.И. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 7. С. 154.
16. Davydov V.V., Dudkin V.I. // Russ. Phys. J. 2015. V. 58. № 2. P. 146.
17. Davydov V.V., Dudkin V.I., Eleseev A.I. // Techn. Phys. Lett. 2015. V. 41. № 5. P. 469.
18. Davydov V.V., Dudkin V.I., Karseev A. Yu. // Instruments and Experimental Techniques. 2015. V. 58. № 6. P. 787.
19. Davydov V.V., Dudkin V.I., Petrov A.A., Myazin N.S. // Techn. Phys. Lett. 2016. V. 42. № 7. P. 692.
20. Давыдов В.В., Дудкин В.И., Мязин Н.С. // РЭ. 2016. Т. 61. № 10. С. 1026.
21. Афанасов И.М., Лазорьяк Б.И. Высокотемпературные керамические волокна. М.: Изд-во МГУ, 2010.
22. Буль Б.К. Основы теории и расчета магнитных цепей. М.: Энергия, 1970.
23. Буль Б.К. Расчет магнитных проводимостей воздушных зазоров для круглых и прямоугольных полюсов. М.: МЭИ, 1961.
24. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. М.: Энергоиздат, 1980.