
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБОРОВ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕТОДИК**

УДК 537.622.3–022.532: 543.422.3–74

© А. И. Жерновой, 2020

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ПО РАЗЛИЧИЮ ЧАСТОТ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ПРОТОНОВ ПРИ ДВУХ ОРИЕНТАЦИЯХ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

Предложен метод определения намагниченности магнитной жидкости с применением ядерного магнитного резонанса, в котором для уменьшения объема образца вместо двух цилиндрических датчиков применяется один датчик при двух ориентациях относительно внешнего магнитного поля. Описаны методики измерений, позволяющие устранить ошибки, вызванные неоднородностью внешнего магнитного поля, влиянием константы эффективного поля. Применение одного цилиндра уменьшает требуемый для измерения намагниченности объем образца исследуемой магнитной жидкости.

Кл. сл.: магнитная жидкость, намагниченность, ядерный магнитный резонанс, две ориентации цилиндрического датчика

ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемый метод измерения намагниченности M магнитной жидкости основан на том, что при помещении магнитной жидкости во внешнее магнитное поле, имеющее напряженность H_0 , частота ядерного магнитного резонанса (ЯМР) f протонов растворителя линейно зависит от M [1, 2]: $f = \gamma[H_0 + (\lambda - K_i) M]$, где $\gamma = 53.4$ Гц·м/А — гиромагнитное отношение протонов, λ — константа эффективного поля, K_i — коэффициент размагничивания образца магнитной жидкости. Индекс i определяется ориентацией образца магнитной жидкости относительно направления напряженности \mathbf{H}_0 : если ось образца параллельна \mathbf{H}_0 , обозначим $i = 1$, если ось образца перпендикулярна \mathbf{H}_0 , обозначим $i = 2$. Значения коэффициентов размагничивания K_i образцов разной формы известны [3], а значения константы эффективного поля λ неопределенны, т.к. они зависят от формы конгломератов наночастиц [4]. Однако λ не зависит от формы образца магнитной жидкости [1]. С учетом этого, чтобы избежать влияния неопределенности λ , в работе [4] было предложено находить намагниченность, измеряя при помощи серийного ЯМР-спектрометра частоты ядерного магнитного резонанса $f_1 = \gamma[H_0 + (\lambda - K_1) M]$ и $f_2 = \gamma[H_0 + (\lambda - K_2) M]$ протонов одной и той же магнитной жидкости в двух образцах, имеющих разные коэффициенты размагничивания K_1 и K_2 . Для этого были применены вытянутый цилиндрический образец, имеющий $K_1 = 0$, $K_2 = 0.5$, и сферический обра-

зец, имеющий при всех ориентациях $K_{1,2} = 0.33$. Чтобы избежать необходимости иметь для измерения M два образца исследуемой магнитной жидкости, в настоящей работе предложено использовать один образец при двух его ориентациях относительно направления напряженности \mathbf{H}_0 внешнего магнитного поля. Например, вытянутый цилиндрический образец при напряженности внешнего магнитного поля, параллельной оси цилиндра, когда $K_i = K_1 = 0$, и при напряженности внешнего магнитного поля, перпендикулярной оси цилиндра, когда $K_i = K_2 = 0.5$. Измерив частоты ядерного магнитного резонанса протонов растворителя магнитной жидкости f_1 при $K_i = K_1$ и f_2 при $K_i = K_2$ внутри длинного цилиндрического образца при двух взаимно перпендикулярных направлениях его оси относительно напряженности внешнего магнитного поля, можно найти намагниченность по формуле $M = (f_1 - f_2) / [\gamma(K_2 - K_1)]$, в которую константа эффективного поля не входит.

Способ определения намагниченности магнитной жидкости по различию частот ядерного магнитного резонанса протонов при двух ориентациях цилиндрического датчика был предложен в статье [5] с целью устранения ошибки измерений, вызванной неоднородностью внешнего магнитного поля. В указанной статье описана установка, содержащая разрезанный вдоль оси цилиндрический датчик, т.е. датчик в виде двух заполненных жидкостью полукруговых цилиндров с расположенной между ними одной катушкой для

измерения магнитного поля. Конструкция датчика в виде разрезанного вдоль оси цилиндра сложна в изготовлении. Кроме того, у разрезанного цилиндра из-за его неправильной формы нужно экспериментально определять коэффициенты размагничивания. Поэтому в настоящей статье предложена конструкция усовершенствованного датчика с одним цилиндром правильной формы, имеющим измерительный канал, которая проста в изготовлении и у которой коэффициенты размагничивания известны.

ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ПРЕДЛАГАЕМЫМ СПОСОБОМ

Для измерения намагниченности исследуемая магнитная жидкость помещается в полый стеклянный цилиндр, играющий роль датчика (рис. 1). В центре цилиндрического датчика имеется поперечный его оси сквозной измерительный канал, по которому протекает вода, а снаружи цилиндрического датчика расположены две радиочастотные катушки для создания в измерительном канале переменного магнитного поля с частотой f . Цилиндрический датчик с катушками располагается вблизи центра магнитной системы, создающей однородное магнитное поле с напряженностью H_0 . При этом его ориентация относительно направления H_0 может быть установлена произвольно. При оси цилиндрического датчика, параллельной H_0 , когда $K_i = K_1$, измеряется частота переменного магнитного поля f_1 ; при оси цилиндрического дат-

чика, нормальной H_0 , когда $K_i = K_2$, измеряется частота переменного магнитного поля f_2 ; напряженность переменного магнитного поля, создаваемого в канале радиочастотными катушками, при обоих направлениях оси цилиндрического датчика должна быть перпендикулярна напряженности H_0 . Особенность описанного датчика в том, что частоты f_1 и f_2 , по которым определяется намагниченность M магнитной жидкости, измеряются в измерительном канале, расположенном внутри магнитной жидкости. Намагниченность магнитной жидкости создает на стенке измерительного канала магнитные заряды — положительный со стороны, где линии магнитной индукции входят в канал, и отрицательный со стороны, где они выходят из канала [6]. Эти заряды увеличивают измеряемую напряженность магнитного поля внутри канала на величину $N_j M$, где множитель N_j по аналогии с коэффициентом размагничивания K внутри заполненного магнитной жидкостью датчика назовем коэффициентом намагничивания, а индексом j обозначим направление канала относительно направления напряженности H_0 внешнего магнитного поля: если ось канала параллельна H_0 , $j = 1$, если ось канала перпендикулярна H_0 , $j = 2$. Внутри цилиндрического канала, если ось канала направлена параллельно H_0 , коэффициент намагничивания $N_1 = 0$, если ось канала перпендикулярна H_0 , коэффициент намагничивания $N_2 = 0.5$. Напряженность поля внутри измерительного канала зависит и от направления оси цилиндрического датчика, и от направления оси канала относительно напряженности H_0 . Если направление

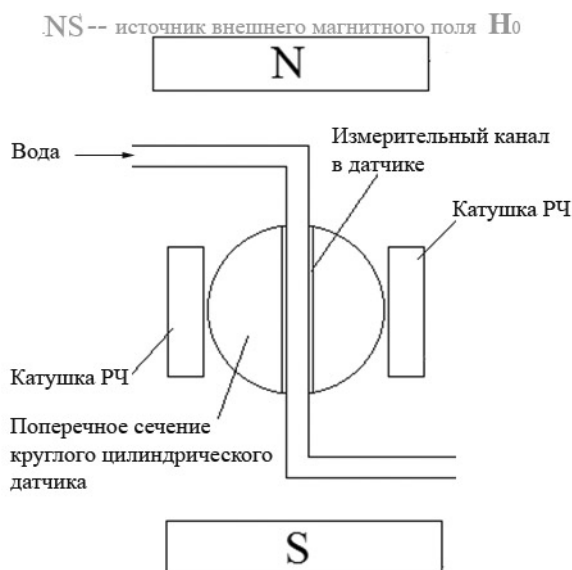


Рис. 1. Схема датчика.

Ориентация цилиндрического датчика во внешнем магнитном поле H_0 от NS может меняться согласно методике измерения. Приведена схема расположения: ось цилиндрического датчика перпендикулярна напряженности H_0 , ось измерительного канала параллельна H_0

оси цилиндрического датчика относительно \mathbf{H}_0 не меняется, а ось канала параллельна \mathbf{H}_0 , то $H = H_0 + (\lambda - K_i + N_1)M$; если при этом ось канала перпендикулярна \mathbf{H}_0 , то $H = H_0 + (\lambda - K_i + N_2)$. В общем случае частота ядерного магнитного резонанса протонов воды в канале

$$f = \gamma [H_0 + (\lambda - K_i + N_j) M]. \quad (1)$$

ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАНТЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ С ОДНИМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ДАТЧИКОМ

Возможны три варианта измерения намагниченности.

Вариант измерения 1. Измеряются определяемые выражением (1) частота f_1 при оси цилиндрического датчика, параллельной \mathbf{H}_0 ($K_i = K_1 = 0$), и оси измерительного канала, перпендикулярной \mathbf{H}_0 ($N_j = N_2 = 0.5$); и частота f_2 при оси цилиндрического датчика и оси канала, перпендикулярных \mathbf{H}_0 ($K_i = K_2 = 0.5$, $N_j = N_2 = 0.5$). Намагниченность определяется с использованием формулы (1): $M = (f_1 - f_2) / [\gamma (K_2 - K_1 + N_1 - N_2)] = (f_1 - f_2) / (\gamma 0.5)$, откуда

$$M = 2(f_1 - f_2) / \gamma. \quad (2)$$

Вариант измерения 2. Измеряется определяемая выражением (1) частота f_1 при оси цилиндрического датчика и оси канала, перпендикулярных \mathbf{H}_0 ($K_i = K_2 = 0.5$, $N_j = N_2 = 0.5$); и частота f_2 при оси цилиндрического датчика, перпендикулярной \mathbf{H}_0

($K_i = K_2 = 0.5$), и оси канала, параллельной \mathbf{H}_0 ($N_j = N_1 = 0$). Намагниченность находится с использованием формулы (1): $M = (f_1 - f_2) / [\gamma (K_2 - K_1 + N_1 - N_2)] = (f_1 - f_2) / (\gamma 0.5)$, откуда, как и в варианте 1,

$$M = 2(f_1 - f_2) / \gamma.$$

Вариант измерения 3. Измеряется частота f_1 при оси цилиндрического датчика, параллельной \mathbf{H}_0 ($K_i = K_1 = 0$), и оси канала, перпендикулярной \mathbf{H}_0 ($N_j = N_2 = 0.5$); и частота f_2 при оси цилиндрического датчика, перпендикулярной \mathbf{H}_0 ($K_i = K_2 = 0.5$), и оси канала, параллельной \mathbf{H}_0 ($N_j = N_1 = 0$). Намагниченность находится с использованием формулы (1): $M = (f_1 - f_2) / [\gamma (K_2 - K_1 + N_1 - N_2)] = (f_1 - f_2) / [\gamma (0.5 + 0.5)]$, откуда

$$M = (f_1 - f_2) / \gamma. \quad (3)$$

СХЕМА УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТ f_1 И f_2

Схема установки приведена на рис. 2.

Для регистрации частот ядерного магнитного резонанса f_1 и f_2 в измерительном канале применен метод нутации. Вода из водопровода протекает по трубке 1 через кювету 2, расположенную в магнитном поле магнита-поляризатора 3, затем по измерительному каналу 4 проходит через заполненный исследуемой магнитной жидкостью цилиндрический датчик 5, помещенный в магнитное поле магнита 6. Из измерительного канала 4 вода поступает в катушку 7 датчика ядерного

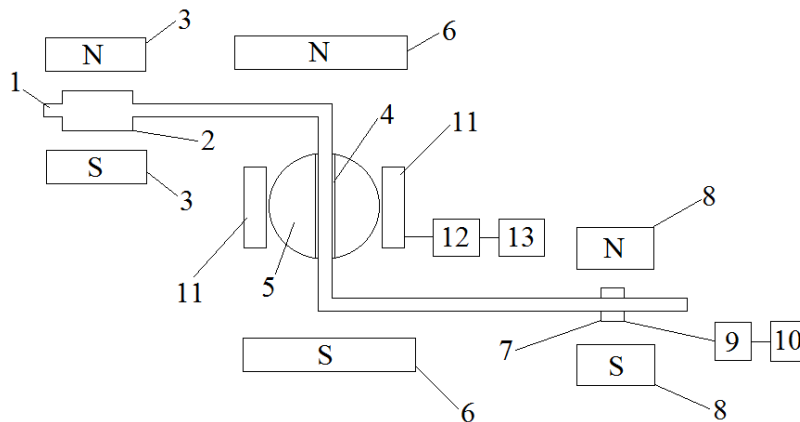


Рис. 2. Схема установки для измерения частот f_1 и f_2 .

1 — трубка, подключенная к водопроводу; 2 — кювета; 3 — магнит-поляризатор; 4 — измерительный канал; 5 — цилиндрический датчик; 6 — магнит; 7 — катушка регистрации сигнала ЯМР; 8 — магнит ЯМР; 9 — измеритель магнитной индукции ШИ-1; 10 — осциллограф; 11 — катушки РЧ-поля; 12 — генератор РЧ-поля; 13 — частотомер

магнитного резонанса, расположенную в магнитном поле магнита 8 и присоединенную к прибору 9, в качестве которого применен измеритель магнитной индукции Ш1-1, на выходе которого возникает сигнал ядерного магнитного резонанса, регистрируемый на экране осциллографа 10. Поиск частот ядерного магнитного резонанса f_1 и f_2 основан на том, что при частоте f переменного магнитного поля, создаваемого катушкой 11, присоединенной к выходу генератора 12, приближающейся к резонансным значениям f_1 и f_2 частот ядерного магнитного резонанса протонов воды в канале 4, сигнал на экране осциллографа 10, пропорциональный намагниченности протонов воды на выходе канала 4, меняет полярность. Значения частот f измеряются частотомером 13, присоединенным к выходу генератора 12. На рис. 2 ось цилиндрического датчика 5, содержащего исследуемую магнитную жидкость, направлена перпендикулярно, а ось измерительного канала 4 — параллельно напряженности внешнего магнитного поля H_0 магнита 6, в котором цилиндр 5 установлен. То есть реализуется вариант 2 измерения частоты f_2 .

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ ОДНОЙ И ТОЙ ЖЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ЯМР НА УСТАНОВКАХ С ОДНИМ И С ДВУМЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ

Для проверки предлагаемого способа измерения намагниченности была использована магнитная жидкость в виде коллоидного раствора наночастиц магнетита в воде с объемной концентрацией твердой фазы 2.7 %, со стабилизатором на основе олеиновой кислоты. На установке с одним цилиндрическим датчиком, схема которой приведена на рис. 2, с использованием варианта измерения 3 при напряженности внешнего магнитного поля $H_{01} = 642$ А/м были получены частоты $f_1 = 45.79$ кГц и $f_2 = 22.65$ кГц. Подставив эти значения в выражение (3), получаем намагниченность $M_1 = (45.79 - 22.65)1000/53.4 = 23.14 \cdot 18.73 = 433.4$ А/м и магнитную восприимчивость $\chi_1 = (M_1 / H_{01}) = (433.4 / 642) = 0.675$.

При напряженности внешнего магнитного поля $H_{02} = 420$ А/м были получены частоты $f_1 = 29.71$ кГц и $f_2 = 15.42$ кГц. Подставив эти значения в выражение (3), получаем намагниченность $M_2 = (29.71 - 15.42)1000/53.4 = 14.29 \cdot 18.73 = 267.75$ А/м и магнитную восприимчивость $\chi_2 = (M_2 / H_{02}) = 267.75 / 420 = 0.64$. Среднее значение магнитной восприимчивости $\chi_{cp} = 0.5(\chi_1 + \chi_2) = 0.656$.

Измерение намагниченности этой же магнитной жидкости методом с двумя цилиндрическими

образцами проводилось на установке, описанной в работе [7]. Исследуемая магнитная жидкость помещалась в два одинаковых длинных стеклянных цилиндрических контейнера, расположенных в магнитном поле с напряженностью H_0 , направленной нормально их осям. Датчиком нутации, расположенным вблизи боковой поверхности одного из контейнеров, измерялась резонансная частота f_1 , а другим датчиком нутации, расположенным в промежутке между контейнерами, измерялась резонансная частота f_2 . Намагниченность магнитной жидкости определялась по формуле (3). Проведение опыта показало, что при напряженности внешнего магнитного поля $H_{01} = 638$ А/м резонансные частоты в датчиках нутации оказались равными $f_1 = 46.8$ кГц, $f_2 = 26.5$ кГц. При этом по формуле (2) намагниченность $M_1 = (46.8 - 26.5)1000/53.4 = 20.3 \cdot 1000/53.4 = 20.3 \cdot 18.73 = 380$ А/м, магнитная восприимчивость $\chi_1 = M_1 / H_{01} = 380 / 638 = 0.6$.

При напряженности внешнего магнитного поля $H_{02} = 416$ А/м измеренные резонансные частоты $f_1 = 29.74$ кГц, $f_2 = 17.21$ кГц. При этом по формуле (3) намагниченность $M_2 = (29.74 - 17.21)1000/53.4 = 12.53 \cdot 1000/53.5 = 12.53 \cdot 18.73 = 234$ А/м, магнитная восприимчивость $\chi_2 = M_2 / H_{02} = 234 / 416 = 0.56$. Среднее значение магнитной восприимчивости $\chi_{cp} = 0.58$.

При таком положении датчика измеряется частота f_2 в варианте измерения 1 и частота f_1 в варианте измерения 2.

ПРЕДПОЛАГАЕМАЯ ПРИЧИНА РАСХОЖДЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ МЕТОДОМ ЯМР С ОДНИМ И С ДВУМЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ

Полученные результаты показали, что предлагаемый способ измерения намагниченности с одним цилиндрическим датчиком дает значения намагниченности и магнитной восприимчивости на 13 % большие, чем известный способ с двумя цилиндрическими датчиками.

Как было показано выше, в методе с одним цилиндрическим датчиком намагниченность магнитной жидкости M и теоретически и экспериментально определяется формулой (3). В методе с двумя цилиндрическими датчиками намагниченность магнитной жидкости M определяют, измеряя методом ЯМР напряженность поля $H_1 = H_0 + KM + \lambda M$ снаружи одного из цилиндров и напряженность поля $H_2 = H_0 - KM - \alpha \lambda M$ между цилиндрами (α — численный множитель, зависящий от расстояния между цилиндрами) [6]. При этом разность частот ЯМР $f_1 - f_2 = \gamma(H_1 - H_2) = \gamma[2K + (1 + \alpha)\lambda]M$, откуда $M = (f_1 - f_2) / [\gamma(2K + (1 + \alpha)\lambda)]$.

Подставив $K = 1/2$, получаем формулу для нахождения намагниченности магнитной жидкости в методе с двумя цилиндрическими датчиками: $M = (f_1 - f_2) / [\gamma(1 + (1 + \alpha)\lambda)]$. Подставив в эту формулу экспериментальные значения $\lambda = 0.187$ [4] и $\alpha = 0.1$ [6], получаем выражение $M = (f_1 - f_2) / (1.2\gamma)$. Так как константа эффективного поля λ зависит от формы конгломератов наночастиц в исследуемой жидкости [8], которую контролировать трудно, намагниченность находят по формуле (3), что дает ошибку в сторону занижения M , составляющую порядка 20 %. В методе с одним цилиндрическим датчиком намагниченность также находят по формуле (3), однако в этом случае, как было показано выше, влияние константы эффективного поля на связь разности частот $(f_1 - f_2)$ и намагниченности отсутствует. Следовательно, полученное при экспериментальной проверке метода расхождение на 13 % результатов измерений намагниченности с одним и с двумя цилиндрическими датчиками может быть вызвано влиянием в методе с двумя датчиками константы эффективного поля λ , которое в методе с одним датчиком исключается.

ВЫВОДЫ

1. Преимущество предлагаемого способа измерения намагниченности с одним цилиндрическим образцом перед известным способом с двумя цилиндрическими образцами в возможности использовать значительно меньший объем исследуемой магнитной жидкости, что удешевляет измерения.

2. Другое преимущество в том, что в методе с одним образцом определение частот f_1 и f_2 , по которым находят намагниченность, можно производить в одной точке внешнего магнитного поля H_0 , а в методе с двумя образцами — в двух разных точках. Это в методе с одним образцом позволяет исключить погрешность измерения намагниченности, вызванную неоднородностью H_0 .

3. Полученное в настоящей работе различие значений намагниченности, измеренных методами с одним и с двумя цилиндрическими датчиками, можно объяснить влиянием константы эффективного поля, что в методе с двумя датчиками занижает полученный результат измерений. Следовательно, предлагаемый в настоящей работе метод ЯМР с одним датчиком, в котором влияние константы эффективного поля исключено, дает более точные значения намагниченности и магнитной восприимчивости, чем метод ЯМР с двумя датчиками.

Описаны методики измерений, позволяющие устранить ошибки, вызванные неоднородностью

внешнего магнитного поля, влиянием константы эффективного поля. Применение одного цилиндра уменьшает требуемый для измерения намагниченности объем образца исследуемой магнитной жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. М.: Химия, 1989. 289 с.
2. Блом Э.Я., Майоров М.М., Цербер А.Б. Магнитные жидкости. Рига: Зинатне, 1989. 386 с.
3. Арнольд Р.Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. М.: Энергия, 1969. 184 с.
4. Жерновой А.И., Наумов В.Н., Рудаков Ю.Р. Измерение намагниченности и константы эффективного поля магнитной жидкости методом ЯМР // Научное приборостроение. 2008. Т. 18, № 2. С. 33–38. URL: <http://iairas.ru/mag/2008/abst2.php#abst4>
5. Жерновой А.И., Дьяченко С.В. Измерение намагниченности магнитной жидкости методом ЯМР с использованием одной измерительной катушки // Научное приборостроение. 2019. Т. 29, № 1. С. 111–115. URL: <http://iairas.ru/mag/2019/abst1.php#abst17>
6. Жерновой А.И., Дьяченко С.В. Наблюдение влияния поверхностных магнитных зарядов на магнитную индукцию внутри и снаружи образца магнитной жидкости в магнитном поле // Научное приборостроение. 2017. Т. 27, № 2. С. 57–60. URL: <http://iairas.ru/mag/2017/abst2.php#abst7>
7. Жерновой А.И., Наумов В.Н., Рудаков Ю.Р. Получение кривой намагничивания дисперсии парамагнитных наночастиц путем нахождения намагниченности и намагничивающего поля методом ЯМР // Научное приборостроение. 2009. Т. 19, № 3. С. 57–61. URL: <http://iairas.ru/mag/2009/abst3.php#abst8>
8. Жерновой А.И., Наумов В.Н., Рудаков Ю.Р. Исследование методом ЯМР изменения внутреннего магнитного поля при образовании агрегатов в дисперсии наночастиц магнетита // Научное приборостроение. 2009. Т. 19, № 1. С. 13–16. URL: <http://iairas.ru/mag/2009/abst1.php#abst3>

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), Санкт-Петербург

Контакты: Жерновой Александр Иванович,
azhspsb@rambler.ru

Материал поступил в редакцию 04.02.2020

DETERMINATION OF MAGNETIZATION INTENSITY OF MAGNETIC LIQUID BY DIFFERENCE OF FREQUENCIES OF NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE OF PROTONS AT TWO ORIENTATIONS OF A CYLINDER SENSOR

A. I. Zhernovoy

The Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Russia

A method is proposed for determining the magnetization intensity of magnetic fluid using nuclear magnetic resonance, in which to reduce the volume of the sample instead of two cylindrical sensors is used one sensor at two orientations in regard to the external magnetic field. Measurement techniques are described to eliminate errors caused by the inhomogeneity of the external magnetic field, the influence of the constant of an effective field. The use of one cylinder reduces the amount of magnetic fluid sample required to measure magnetization.

Keywords: magnetic fluid, magnetization intensity, nuclear magnetic resonance, two orientations of a cylindrical sensor

REFERENCES

1. Berkovskij B.M., Medvedev V.F., Krakov M.S. *Magnitnye zhidkosti* [Magnetic fluids]. Moscow, Himiya Publ., 1989. 289 p. (In Russ.).
2. Blyum E.Ya., Majorov M.M., Cerber A.B. *Magnitnye zhidkosti* [Magnetic fluids]. Riga, Zinantne, 1989. 386 p.
3. Arnold R.R. *Raschet i proektirovanie magnitnyh sistem s postoyannymi magnitami* [Calculation and design of permanent magnet systems]. Moscow, Energiya Publ., 1969. 184 p. (In Russ.).
4. Zhernovoy A.I., Naumov V.N., Rudakov Yu.R. [Measurement of magnetization and effective field constant of magnetic liquid by NMR method]. *Nauchnoe priborostroenie* [Scientific instrumentation], 2008, vol. 18, no. 2, pp. 33–38. (In Russ.).
URL: <http://iairas.ru/en/mag/2008/abst2.php#abst4>
5. Zhernovoy A.I., Dyachenko S.V. [A measurement of a magnetic liquid magnetization by NMR method with one measuring bobbin]. *Nauchnoe priborostroenie* [Scientific instrumentation], 2019, vol. 29, no. 1, pp. 111–115. (In Russ.). DOI: 10.18358/np-29-1-i111115
6. Zhernovoy A.I., Diachenko S.V. [Observation of the impact of the surface magnetic charges on the magnetic induction inside and outside a sample of the magnetic fluid, placed in an external magnetic field]. *Nauchnoe priborostroenie* [Scientific instrumentation], 2017, vol. 27, no. 2, pp. 57–60. DOI: 10.18358/np-27-2-i5760 (In Russ.).
7. Zhernovoy A.I., Naumov V.N., Rudakov Yu.R. [Obtaining a magnetization curve of dispersion of paramagnetic nanoparticles by finding magnetization and magnetizing field with the use of NMR]. *Nauchnoe priborostroenie* [Scientific instrumentation], 2009, vol. 19, no. 3, pp. 57–61. URL: <http://iairas.ru/en/mag/2009/abst3.php#abst8>
8. Zhernovoy A.I., Naumov V.N., Rudakov Yu.R. [Study of changes in the internal magnetite field during the formation of aggregates in the dispersion of magnetite nanoparticles by NMR]. *Nauchnoe priborostroenie* [Scientific instrumentation], 2009, vol. 19, no. 1, pp. 13–16. URL: <http://iairas.ru/en/mag/2009/abst1.php#abst3>

Contacts: *Zhernovoy Aleksandr Ivanovich*,
azhspsb@rambler.ru

Article received by the editorial office on 04.02.2020