

## Разработка способа, устройства и методики измерения намагниченности нанодисперсной магнитной жидкости

Перминов С.М., канд. тех. наук

Предлагаются новые способ, устройство и методика измерения намагниченности нанодисперсных магнитных жидкостей. Показаны проблемы и пути решения поставленной задачи, приведены результаты измерений.

**Ключевые слова:** намагниченность, нанодисперсная магнитная жидкость, магнитное поле, тороид, измерительная обмотка.

## Mining of a way, device and measuring technique magnetizations nanodispered of a magnetic liquid

Perminov S.M., Candidate of Engineering Science

The known ways of research of magnetic properties of matters not usable for nanodispered magnetic liquids on a lot of basis. New method, device and measuring technique of magnetization nanodispered magnetic liquids are developed. Problems and ways of solution of the given problem are shown. The results of measurements are given.

**Keywords:** magnetization, nanodispered magnetic liquid, magnetic field, toroid, measuring winding.

В 60-е годы прошлого столетия были получены первые образцы устойчивого коллоида ферромагнитных частиц с размерами около 10 нм [1]. Эти коллоиды интересны тем, что способны намагничиваться при помещении их в магнитное поле, а следовательно, притягиваться магнитным полем. Коллоиды получили название магнитные жидкости (МЖ). По сравнению с жидкими средами, существующими в природе, они обладают супермагнитными свойствами [2, 3]. Реакция МЖ на магнитное поле в тысячи раз сильнее, чем реакция природных жидких сред. Но твердым ферромагнитным материалам они существенно проигрывают: намагниченность железа примерно в 100 раз выше предельной намагниченности МЖ [4, 5].

Так как синтезированные МЖ хорошо реагировали на воздействие магнитного поля, появился ряд идей по созданию новых технических устройств. Для этого потребовалось исследовать свойства МЖ. Основной характеристикой, определяющей магнитные свойства вещества, является кривая намагничивания.

Из теории магнитных измерений известно, что магнитные свойства жидкостей принято измерять по методу поднятия жидкостей в магнитном поле [6]. Измеряемую жидкость наливают в сосуд А (рис. 1), состоящий из капиллярной трубки и баллона большого сечения. Капиллярную трубку помещают между полюсами электромагнита ЭМ. При включении поля жидкость с положительной магнитной восприимчивостью поднимается, с отрицательной восприимчивостью – опускается.

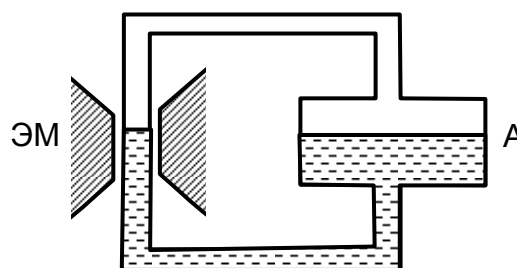


Рис. 1. Схема устройства прибора, основанного на методе поднятия жидкостей

Если пренебречь восприимчивостью газа, находящегося над жидкостью, восприимчивость последней можно определить по формуле

$$\chi = \Delta h / H^2, \quad (1)$$

где  $\Delta h$  – высота поднятия жидкости;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $H$  – напряженность магнитного поля в зазоре электромагнита.

При использовании нулевого метода в капилляре над жидкостью повышают давление газа и уровень жидкости возвращают в исходное положение. Тогда составляющую числителя в (1) заменяют на величину избыточного давления  $\Delta P$ .

Для магнитной жидкости данный метод оказался неприемлемым. Так как жидкость непрозрачна, во время измерительных процедур капилляр становится непросматриваемым, что не позволяет наблюдать за уровнем жидкости в капилляре. Кроме этого, вязкость ряда магнитных жидкостей, используемых на практике, значительна, что вносит погрешность в результаты измерений.

Использование других известных методов измерения восприимчивости жидкостей [6, 7] по разным причинам также оказалось неприемлемым.

Иной путь определения магнитных свойств жидкого вещества заключается в помещении его в герметичную немагнитную капсулу, тогда появляется возможность применить методы измерений, используемые при исследовании твердых веществ.

Из названных методов наиболее отработанным и широко используемым является баллистический метод [8].

Для исследования МЖ баллистическим методом был изготовлен полый стеклянный тороид, имеющий на поверхности два заправочных отверстия. Тороид имел круглое внутреннее сечение диаметром 20 мм, а его средний диаметр составлял 120 мм. Измерительная и намагничивающая обмотки были нанесены на поверхность тороида. С помощью тороида были сняты первые кривые намагничивания МЖ:

$$B = \mu_0(H + M), \quad (2)$$

где  $M$  – намагниченность вещества;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума.

Работа с тороидом выявила следующее. Во-первых, диапазон измерения по напряженности поля мал, нельзя измерить максимальную намагниченность жидкости (намагниченность насыщения). Во-вторых, точность измерения оказалась невысокой, снижающейся с ростом напряженности поля. Это объясняется тем, что чем выше напряженность магнитного поля, тем меньше полезная составляющая измеряемого сигнала.

На рис. 2 показана экспериментальная кривая намагничивания  $B = f(H)$ . Индукцию  $B$  можно рассматривать как сумму двух составляющих: первая – определяет, какую индукцию создает поле напряженностью  $H$  в вакуумном пространстве, вторая – насколько увеличивается индукция, если пространство заполнить магнитным веществом.

Когда исследуется твердый ферромагнитный материал, допустим, железо, первая составляющая уравнения (2) мала и равна, примерно, одной сотой и меньше второй составляющей. Поэтому до определенных значений напряженности поля первой составляющей уравнения можно пренебречь. Как отмечалось выше, магнитные свойства МЖ гораздо слабее, чем у железа. На начальном участке кривой намагничивания первая составляющая уравнения (2) превышает вторую обычно в несколько раз. При  $H = 15\text{--}30$  кА/м они становятся соизмеримыми. Далее, вторая уменьшается и составляет единицы процентов от первой при напряженности порядка 1000 кА/м, т. е. первая составляющая «заглушает» вторую. Первую составляющую можно считать паразитной, в ней не заложено никакой информации о свой-

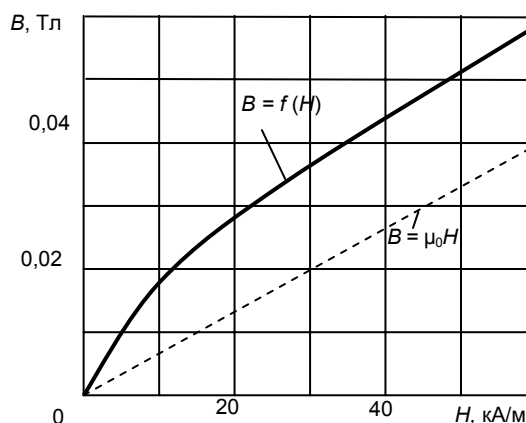


Рис. 2. Кривая намагничивания магнитной жидкости

ствах исследуемого вещества. Поэтому традиционный баллистический метод измерения магнитных свойств ферромагнитных материалов не обеспечивает достаточной точности при исследовании МЖ.

Точность измерений можно повысить, если найти способ измерения только второй составляющей уравнения (2) –  $\mu_0 M$ . В [9] описан метод, в котором образец жидкости помещается в кювету, сделанную из немагнитного диэлектрика в форме сильно вытянутого эллипсоида, чтобы однородному внешнему полю  $H$  соответствовало однородное поле внутри образца и, следовательно, однородная намагниченность. Измерительная катушка закреплялась в центре соленоида, где магнитное поле имеет высокую однородность, и подключалась к гальванометру. Кювета с жидкостью с помощью немагнитного стержня вводилась в измерительную катушку, устанавливалась заданная напряженность магнитного поля  $H$  в центре соленоида. В момент стремительного удаления кюветы из соленоида измерялось изменение потокосцепления измерительной катушки

$$\Delta\Phi = \mu_0 M - NM, \quad (3)$$

где  $N$  – размагничивающий фактор кюветы с жидкостью.

Точность измерений намагниченности существенно повысилась. Но появились новые вопросы, связанные с определением  $N$ , а главное, диапазон измерений по напряженности поля оказался недостаточным. Выпускаемые промышленностью соленоиды обеспечивают напряженность магнитного поля около 100 кА/м. При такой напряженности поля намагниченность жидкости не достигает состояния насыщения. Предельную намагниченность приходится определять методом экстраполяции функции  $M = f(1/H)$ . МЖ выходят на насыщение, примерно, при  $H = 500\text{--}700$  кА/м. Поля данного уровня могут обеспечить электромагниты с замкнутыми магнитопроводами. Но реализовать рассмотренный выше способ с удалением

образца из катушки, находящейся в межполюсном зазоре электромагнита, невозможно.

Из теории магнитных измерений известен способ определения намагниченности вещества на основе баллистического метода, в котором последовательно с измерительной обмоткой включают точно такую же компенсирующую обмотку и располагают их так, что без образца, при изменении поля, в них отсутствует ЭДС индукции [6]. Если поместить образец в одну из измерительных обмоток, то при изменении внешнего магнитного поля в системе обмоток возникает ЭДС, пропорциональная намагниченности вещества.

Использовать данный способ для измерения жидкого вещества сложно по следующим причинам. Невозможно изготовить две совершенно одинаковые катушки и точно разместить их по отношению к магнитному полю. Следовательно, разностная ЭДС всегда будет существовать и снижать точность измерений, особенно в сильных полях. Остается также проблема ввода образца-кюветы в одну из обмоток, когда они находятся в ограниченном межполюсном пространстве электромагнита.

Решить проблему удалось за счет использования свойства текучести исследуемого вещества. Был разработан новый способ измерения и устройство, его реализующее, позволяющие производить измерение намагниченности МЖ в магнитном поле высокой напряженности ограниченного межполюсного пространства электромагнита с полной компенсацией разностной ЭДС измерительных обмоток. Способ заключается в следующем. В однородное магнитное поле межполюсного пространства электромагнита вводятся две пустые капсулы. Капсулы охвачены двумя одинаковыми измерительными обмотками  $W_1$  и  $W_2$  (рис. 3), включенными встречно.

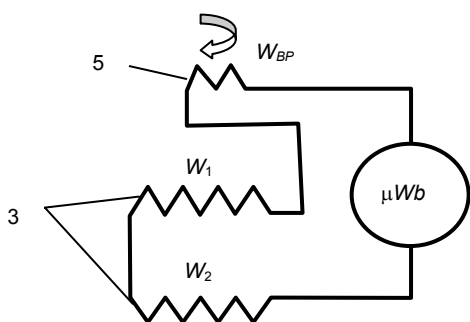


Рис. 3. Схема подключения измерительных обмоток

В этом же магнитном поле размещена компенсирующая обмотка  $W_{BP}$ , включенная последовательно с измерительными и имеющая возможность менять угол между своей плоскостью и вектором напряженности магнитного поля. Методом импульсного изменения внешнего магнитного поля на противополож-

ное, поворачивая компенсирующую обмотку, добиваются нулевого значения результирующего сигнала всех трех обмоток. После этого через заправочные отверстия в отсутствии поля одну из капсул заполняют исследуемым жидким веществом. Методом импульсного изменения внешнего магнитного поля на противоположное определяют изменение потокосцепления катушек и по формуле

$$M = \Delta\psi / 2S \cdot W, \quad (4)$$

где  $\Delta\psi$  – изменение потокосцепления катушек;  $S$  – площадь внутреннего сечения капсулы, заполненной жидким веществом;  $W$  – число витков измерительной катушки, рассчитывают намагниченность МЖ для выбранного значения напряженности поля.

Данный способ был реализован с помощью устройства, показанного на рис. 4, 5. Две одинаковые капсулы 1, выполненные в виде полых цилиндров, размещены в каркасе 2. На капсулы 1 нанесены одинаковые измерительные обмотки 3, включенные встречно. В каркасе 2 установлен винт 4, в прорези которого закреплена компенсирующая обмотка 5, соединенная последовательно с измерительными обмотками. С торцов капсулы герметично закрываются параллельно расположенными пластинами 6, выполненными из магнитомягкого материала. В толще каркаса и стенках капсул выполнены заправочные отверстия 7, закрывающиеся заглушками 8. Капсулы 1, каркас 2, винт 4, заглушки 8 изготовлены из немагнитного, неэлектропроводного материала. Измерительные 3 и компенсирующая 5 обмотки расположены в центральной части устройства, где поле однородно. Устройство зажимается плотно без зазора между полюсными наконечниками намагничивающего устройства, что обеспечивает замкнутость магнитной цепи установки.

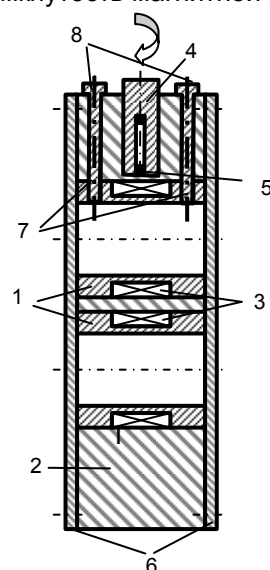


Рис. 4. Устройство измерения намагниченности МЖ

Параллельное расположение магнитопроводящих пластин 6 обеспечивает однород-

ность магнитного поля в капсулах 1. Капсулы 1 выполнены в виде полых цилиндров с постоянным внутренним сечением. Помещаемая в одну из капсул исследуемая жидкость контактирует с параллельными магнитомякими пластинами 6. Эти условия обеспечивают однородность намагничивания исследуемой жидкости по всему объему капсулы.

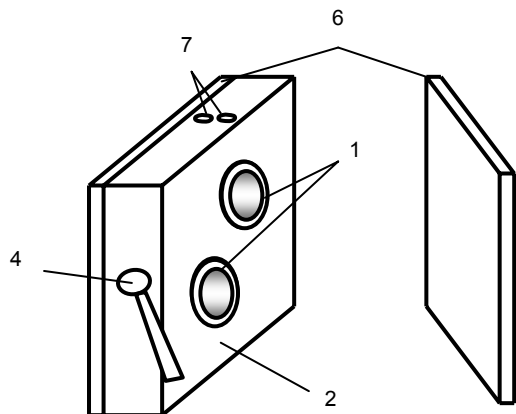


Рис. 5. Внешний вид измерительного устройства

Измерение намагниченности МЖ выполняется следующим образом. Устройство зажимается плотно, без зазора между полюсными наконечниками намагничивающего устройства. Цепь измерительных обмоток подсоединяется к микровеберметру. Регулируя ток намагничивающего устройства, устанавливают заданную напряженность однородного магнитного поля в капсулах. Для измерения напряженности поля используют стандартные методы и средства, в частности, может использоваться катушка напряженности или датчик Холла, расположенные в непосредственной близости от внутренней полости капсулы, предназначенной для заполнения. При коммутации тока намагничивающего устройства измеряют результирующее потокоцепление трех обмоток. Если результирующее потокоцепление отличается от нуля, поворачивая винт 4 с расположенной на нем компенсирующей обмоткой, постепенно добиваются нулевого показания микровеберметра. Через заправочное отверстие 7 заполняют одну из капсул МЖ. Заправочные отверстия закрываются заглушками 8. Производится измерение результирующего потокоцепления  $\Delta\Psi$  трех обмоток в момент изменения направления тока намагничивающего устройства на противоположное и по формуле (4) рассчитывается намагниченность МЖ. Таким способом снимают ряд последовательных точек, после чего строят зависимость  $M = f(H)$  исследуемой МЖ.

Перминов Сергей Михайлович,  
Ивановский государственный энергетический университет,  
кандидат технических наук, докторант кафедры электромеханики,  
e-mail: elmash@em.ispu.ru

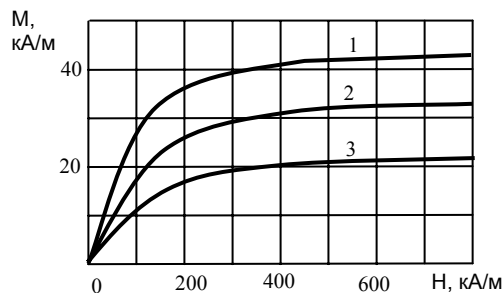


Рис. 6. Экспериментальные кривые намагничивания магнитных жидкостей: 1 – МЖ МК 2-40; 2 – МЖ МК 2-30; 3 – МЖ МК 2-25

С помощью разработанного устройства были исследованы образцы МЖ, выпускаемые ПНИЛ ПФГД ИГЭУ. На рис. 6 приведены результаты измерений трех образцов МЖ.

Опыт эксплуатации устройства показал следующее:

1. Сведение к нулю результирующего потокоцепления трех измерительных обмоток при балансировке системы в отсутствие жидкости не представляет сложности, поэтому метод позволяет обеспечить высокую точность измерений намагниченности МЖ, зависящую только от точности используемых приборов.

2. Устройство позволяет измерять намагниченность в широком диапазоне напряженности магнитного поля, что важно при анализе качества и структуры МЖ, при выполнении электромагнитных расчетов магнитожидкостных устройств.

3. При использовании стандартного электромагнита достигается состояние насыщения МЖ. Измерение намагниченности насыщения важно для выпускного контроля и паспортизации МЖ.

#### Список литературы

1. Papell S.S. Low Viscosity Magnetic Fluid Obtained by the Colloidal Suspension of Magnetic Particles, US Patent, No. 3215572, 1965.
2. Rosensweig R.E. Magnetic Fluids // Int. Sci. Tech., – No. 55. – 1966.
3. Вонсовский С.В. Магнетизм. – М.: Наука, 1971.
4. Бозорт Р. Ферромагнетизм. – М.: Изд-во ин. литры, 1956.
5. Вонсовский С.В. Магнетизм микрочастиц. – М.: Наука, 1973.
6. Чечерников В.И. Магнитные измерения. – М.: Изд-во МГУ, 1969.
7. А.с. СССР №580532 / Чеканов В.В., Кл. G 01 В 33/12.
8. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы. – М.: Высш. шк., 1976.
9. Фертман В.Е. Магнитные жидкости – естественная конвекция и теплообмен. – Мн.: Наука и техника, 1978. – С. 37–38.