

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 12

ТВЕРЬ 2020

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2020. – Вып. 12. – 908 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2020

© Тверской государственный университет, 2020

МОБИЛЬНЫЙ МАГНИТОМЕТР ДЛЯ ЭКСПРЕСС – ТЕСТА НАМАГНИЧЕННОСТИ НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТНЫХ НАНОЖИДКОСТЕЙ

А.Н. Болотов, О.О. Новикова

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

170026, Россия, Тверь, наб. А. Никитина, 22

alnikbltov@rambler.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.557

Аннотация: Работа направлена на создание магнитометрического прибора для точного определения намагниченности насыщения магнитных наножидкостей и подобных по свойствам функциональных дисперсных материалов. В основе прибора лежит магнитометрический метод с холловскими преобразователями индукции, усовершенствованный с учетом особенностей физико-механических свойств жидкостей. Измерительная магнитная система прибора построена таким образом, чтобы с помощью постоянных магнитов можно было создавать однородное намагничивающее поле величиной до $(2 \div 4) \cdot 10^5$ А/м в рабочем зазоре, где установлена кювета с изучаемой магнитной наножидкостью. Под кюветой с магнитной наножидкостью в среднем ее сечении располагается преобразователь Холла, который служит для измерения напряженности намагничивающего магнитного поля. Второй преобразователь Холла, предназначенный для измерения индукции магнитного поля в веществе, установлен в канавке прямоугольного сечения и располагается по центру магнитной наножидкости в кювете. Относительная ошибка измерения намагниченности на приборе не превышала 2 % для магнитных наножидкостей с намагниченностью в диапазоне от 10 кА/м до 50 кА/м. Созданный прибор может использоваться для экспресс – измерений в лабораторных и промышленных условиях и не требует специальных профессиональных навыков. Показано, что аддитивная составляющая инструментальной погрешности измерений зависит от значений остаточного напряжения (ЭДС неэквипотенциальности), побочных гальваномагнитных эффектов и термо-ЭДС измерительного преобразователя. Мультипликативная составляющая связана с временной и температурной нестабильностью коэффициента преобразования и тока или напряжения питания. Методическая погрешность магнитометра вызвана тем, что для измерений индукции магнитного поля используется не полностью замкнутая магнитная цепь. Показано, что по своим метрологическим параметрам прибор отвечает международным стандартам на магнитные измерения магнитомягких материалов. Прибор позволил определить намагниченность коллоидных систем в магнитных полях начала парапроцессов, индивидуальную намагниченность наночастиц дисперсной фазы, агрегативную устойчивость коллоидов в магнитных и гравитационных полях, оценить размеры сольватной оболочки наночастиц.

Ключевые слова: магнитная наножидкость, намагниченность насыщения, преобразователи Холла, магнитная система, погрешность измерений, численное моделирование.

1. Введение

Магнитные наножидкости – это новый класс многофункциональных нанодисперсных материалов, имеющих широкие научные и практические

перспективы [1-3]. Основная отличительная особенность магнитных наножидкостей от других коллоидных материалов заключается в их относительно высокой намагниченности. Поэтому, существует потребность в приборах для изучения процессов намагничивания магнитных наножидкостей.

При разработке магнитных наножидкостей, отслеживании технологического регламента процесса их производства, а также для контроля перед заправкой в технические и медико-биологические изделия достаточно знать не всю кривую намагничивания магнитных наножидкостей, а лишь значение намагниченности насыщения. Однако в настоящее время отсутствуют простые по конструкции, мобильные и точные приборы, которые позволяют измерять намагниченность магнитных наножидкостей за короткий промежуток времени и с малыми затратами исследуемого материала [4-8].

В настоящее время, для изучения магнитных свойств магнитных материалов все шире используются магнитометры с датчиками Холла. Применительно к определению свойств магнитных наножидкостей магнитометрический метод с холловскими преобразователями индукции вполне может быть положен в основу приборов для изучения намагниченности наножидкостей при усовершенствовании его с учетом особенностей физико-механических свойств жидкостей. Этот метод наиболее полно удовлетворяет всему комплексу требований, предъявляемых к исследованию магнитных свойств магнитных наножидкостей. Поэтому именно магнитометрический метод и был положен в основу разработанного прибора.

Цель работы заключалась в проведении исследований, направленных на создание и метрологический анализ прибора для измерения намагниченности магнитных наножидкостей в относительно высоких магнитных полях, достаточных для определения намагниченности технического насыщения магнитных наножидкостей. К прибору предъявляются следующие основные требования: в соответствии с международными стандартами на магнитные измерения погрешность определения намагниченности не должна превышать 3 %; процесс измерений одной пробы магнитной наножидкости объемом не более 1 см³ должен занимать короткий промежуток времени – 1÷3 минуты; прибор должен иметь небольшие габариты и массу для удобства транспортировки и после включения быстро выходить на рабочий режим.

2. Конструктивные особенности магнитометра МДМ-П1, принцип работы и методика измерений

Конструкция магнитометра приведена на рис. 1. Внешний вид

прибора показан на рис. 2. Магнитная система прибора построена таким образом, чтобы с помощью постоянных магнитов можно было создавать однородное намагничивающее поле H величиной до $(2 \div 4) \cdot 10^5$ А/м в рабочем зазоре, где установлена кювета с изучаемой магнитной наножидкостью (4). Два встречно намагниченных постоянных призматических магнита (1) выполненных из сплава $SmCo_5$ вместе с примыкающими к ним магнитопроводами в виде пластин (2) из магнитомягкой стали (Сталь 20), образуют два симметричных замкнутых магнитных контура. Магнитные потоки, создаваемые постоянными магнитами, складываются в рабочем зазоре и удваивают величину напряженности намагничивающего магнитного поля.

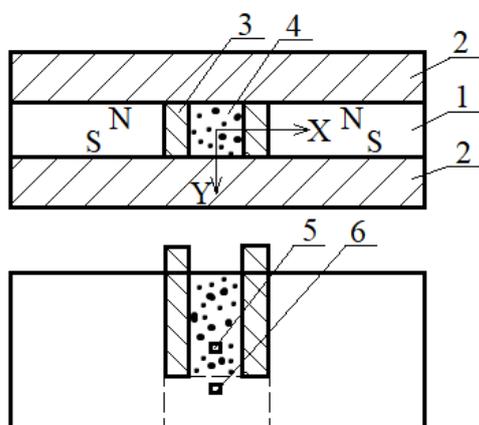


Рис. 1. Схема магнитной системы прибора МДМ-П1.



Рис. 2. Внешний вид прибора МДМ-П1.

Кювета для магнитной наножидкости (3) имеет П-образный каркас из немагнитного материала. Две поверхности каркаса, обращенные к магнитопроводам, закрыты медной фольгой. Кювета плотно (без воздушных зазоров) вставляется в рабочую полость магнитной системы.

Призматические магниты имеют размеры – $30 \times 30 \times 10$ мм³, толщина магнитопровода – 10 мм, толщина медной фольги – 0,05 мм, сечение полости кюветы заполненной магнитной наножидкостью – 10×10 мм², сечение ее боковых стенок 5×10 мм², нижней – 10×10 мм². Кювета заполняется исследуемой жидкостью объемом не менее 1 см³, точный контроль объема магнитной наножидкости не требуется.

Под кюветой с магнитной наножидкостью в среднем ее сечении располагается преобразователь Холла (5), который предназначен для измерения напряженности намагничивающего магнитного поля H . Такой подход к измерению намагничивающего поля в веществе объясняется тем, что тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля на границе раздела сред магнитная наножидкость – воздух не изменяет своего значения. Этот преобразователь нельзя исключить, потому что

намагничивающее поле зависит от магнитных свойств исследуемого объекта. Зная, что нормальная составляющая индукции магнитного поля остается постоянной при переходе через границу двух сред. Если между двумя граничащими магнитными средами выполнена тонкая немагнитная прослойка, то магнитная индукция в ней будет почти такой же, как без прослойки. На основании этого второй преобразователь Холла (6) установлен в пазе прямоугольного сечения и располагается по центру магнитной наножидкости в кювете. Его назначение – измерять индукцию магнитного поля B в исследуемом веществе. В приборе установлены преобразователи Холла на основе гетероэпитаксиальных пленок $n\text{-InSb-i-GaAs}$ марки ПХЭ 607817Б, имеющие следующие характеристики: размеры – $1 \times 1 \times 0,6$ мм³ (размер активной зоны – $0,45 \times 0,15$ мм²), температурный коэффициент ЭДС Холла – $0,02\%$ К⁻¹, остаточное напряжение ≈ 5 мкВ, коэффициент нелинейности при $B = 2$ Тл – $0,04\%$, диапазоном рабочих температур от -270°C до $+100^\circ\text{C}$.

Измерительная схема установки с преобразователями Холла помимо самих преобразователей включает в себя стабилизированные источники постоянного питания и измерительные усилители в каналах измерения B и H (схемы прямого преобразования). Для повышения точности измерений используется схемотехнический метод коррекции ЭДС неэквипотенциальности.

Преобразователи Холла имеют одинаковую чувствительность и включены в единую измерительную электрическую цепь встречно, для определения ЭДС Холла пропорциональной намагниченности исследуемого материала. Сигнал с датчиков Холла усиливается таким образом, чтобы цифровое значение показаний прибора отражалось в абсолютных величинах намагниченности.

Первоначально, до теоретической оценки погрешностей измерений, прибор был протарирован с помощью магнитных наножидкостей, намагниченность которых, предварительно определялась на прецизионном вибрационном магнитометре. Относительная ошибка измерения намагниченности на приборе не превышала 2% для магнитных наножидкостей с намагниченностью в диапазоне от 10 кА/м до 50 кА/м.

Процедура измерений тривиальна и доступна даже специально не подготовленным лаборантам. Из прибора вынимается кювета и очищается от остатков исследуемой ранее магнитной наножидкости. После включения прибора и прогрева его показания должны быть нулевыми, поскольку оба преобразователя Холла фиксируют одинаковое значение напряженности магнитного поля; в противном случае необходимо устранить сигнал, обусловленный дрейфом нуля. Затем в кювету, с помощью медицинского шприца заливается новая порция магнитной

наножидкости объемом $1 \div 2 \text{ см}^3$ и кювета помещается в рабочий зазор намагничивающей системы. С цифрового индикатора прибора считывается показание намагниченности с точностью до десятых кА/м.

Магнитометр вполне может использоваться для широкого круга дисперсных и монокристаллических материалов с более высокой, чем у магнитных наножидкостей намагниченностью после проведения процедуры тарировки.

3. Анализ инструментальных и методических погрешностей магнитометра МДМ-П1

При анализе инструментальных погрешностей измерений приборов с гальваномагнитными преобразователями [9] их обычно разделяют на аддитивные и мультипликативные, т. е. зависящие и не зависящие от значений измеряемых величин. Аддитивная погрешность измерений зависит от значений остаточного напряжения (ЭДС неэквипотенциальности), побочных гальваномагнитных эффектов и термо-ЭДС измерительного преобразователя, а мультипликативная составляющая связана с временной и температурной нестабильностью коэффициента преобразования и тока или напряжения питания. Другим источником ошибок может быть нелинейность ЭДС Холла в рабочем диапазоне значений магнитной индукции.

Остаточным напряжением преобразователя Холла называется напряжение, которое возникает между холловыми электродами при прохождении тока через преобразователь в отсутствие магнитного поля. Причиной остаточного напряжения в первую очередь является расположение Холловых электродов в неэквипотенциальных точках пластины. Устранение аддитивной погрешности, вызванной остаточным напряжением, осуществлялось при совместном использовании преобразователя Холла и операционного усилителя с дифференциальным входом, который имеют малый температурный дрейф и независимую цепь коррекции выходного смещения, при помощи которой осуществляется компенсация остаточного напряжения.

При наличии температурного градиента между холловыми контактами, каждый из которых является соединением медного вывода с полупроводниковым материалом, в цепи возникает термо-ЭДС. Для уменьшения градиента температур преобразователи Холла укрепляли на подложке из материала с хорошей теплопроводностью. Положительной стороной магнитометра является отсутствие в его конструкции электромагнита, который является дополнительным источником тепла. Погрешность нуля, обусловленная дрейфом остаточного напряжения, является одной из наиболее трудно устранимых составляющих

погрешности преобразователей Холла. Дрейф главным образом связан с колебаниями температуры преобразователя и наличием градиента температур между его электродами. Однако эта погрешность важно лишь при измерении очень слабых магнитных полей.

Температурная погрешность преобразователей Холла, обусловленная зависимостью от температуры постоянной Холла, для рассматриваемого прибора несущественна, поскольку измерения проводились в узком диапазоне температур, и используемые преобразователи Холла имеют сравнительно низкий температурный коэффициент чувствительности.

Мультипликативная погрешность линейности, обусловленная зависимостью чувствительности преобразователей Холла от индукции магнитного поля. Для рассматриваемого прибора ошибка линейности незначительна благодаря малому значению коэффициента нелинейности, а также из-за того, что измерения проводились в узком диапазоне магнитных полей.

Остановимся более детально на методической погрешности магнитометра, вызванной несовершенством методов измерения магнитных полей в приборе. Одна из конструктивных особенностей магнитометра заключается в том, что для измерений используется не полностью замкнутая магнитная цепь, в которой содержатся участки с магнитной проницаемостью существенно ниже проницаемости объекта исследований. Это участки цепи, в которых зазоры между магнитопроводами и магнитной наножидкостью образованные немагнитными стенками кюветы и участок, содержащий полость для преобразователя Холла. Наличие немагнитных участков в магнитной цепи приводит к искажению картины силовых линий в области расположения образца и преобразователя Холла и к появлению полей рассеяния. В результате наблюдается неоднородность намагничивания испытуемого образца, проявляющаяся в изменении его магнитного потока по длине и по площади сечения, а также перераспределение магнитного потока вокруг немагнитной полости. Отсюда вытекает основная причина методической погрешности прибора – отличие индукции магнитного поля, измеряемого в полости магнитопровода от индукции магнитного поля в нейтральном сечении.

Еще одна методическая погрешность, присущая устройствам с не полностью замкнутой магнитной системой, связана с конечным расстоянием от поверхности образца преобразователя Холла, предназначенного для измерения напряженности намагничивающего магнитного поля. Напряженности магнитного поля у поверхности образца может отличаться от значения поля в области активной зоны преобразователя.

Намагниченность вещества J можно выразить через индукцию B в веществе и напряженность магнитного поля H следующим образом: $J = B/\mu_0 - H$. Тогда абсолютную погрешность измерений первоначальной определенной намагниченности J_i^* , вызванную методическими причинами, можно найти по формуле:

$$\Delta J_i^* = J_i^* \sqrt{\left(\frac{\partial \ln J}{\partial B}\right)^2 \Delta B + \left(\frac{\partial \ln J}{\partial H}\right)^2 \Delta H} \leq J_i^* \left(\frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta H}{H}\right), \quad (1)$$

где i – номер опыта, $\Delta H, \Delta B$ – методическая погрешность напряженности и индукции магнитного поля, H, B – действующие значения намагничивающего поля и индукции магнитного поля в веществе. Отсюда действительная намагниченность i -го измерения с учетом приведенной методической погрешности равна:

$$J_i \approx J_i^* \left(1 + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta H}{H}\right) = J_i^* k, \quad (2)$$

где k – поправочный коэффициент, определяемый опытным путем или с помощью расчетов. На следующем этапе обработки результатов серии измерений намагниченности, определяется случайная погрешность намагниченности.

В научной литературе отсутствуют достоверные и универсальные оценки методической погрешности определения B и H в магнитных полостях и зазорах магнитной цепи с постоянными магнитами. Для определения указанных погрешностей был выбран подход, основанный на компьютерном моделировании с помощью метода конечных элементов.

4. Определение методической ошибки прибора с помощью численного моделирования

Задача расчета параметров магнитного поля в магнитной системе прибора МДМ-П1 выполнялся численным методом, с помощью компьютерной программы Elcut [10], созданной для проведения двумерного моделирования методом конечных элементов и инженерного анализа. Метод конечных элементов по сравнению с другими численными методами позволяет решать нелинейные задачи магнитостатики с высокой точностью.

На первом этапе решения создана плоская геометрическая модель исследуемой магнитной системы, которая показана на рис. 3. Реальная магнитная система состоит из двух частей симметричных относительно плоскости, проходящей через центр рабочего зазора. Поэтому геометрическая модель воспроизводит одну из этих частей для оптимизации процесса вычислений.

На следующем этапе при решении задачи описаны свойства среды в

соответствующих блоках, указаны источники поля и определены граничные условия. В качестве источника поля выступал постоянный магнит КС37, выполненный из сплава $SmCo_5$, свойства которого (кривая размагничивания) были взяты из [11]. Для магнитопроводов, выполненных из стали (Сталь 20), задана кривая намагничивания. В качестве объектов изучения выбраны три магнитные наножидкости с намагниченностями 10, 30 и 50 кА/м, а также для сравнения материал с высокой намагниченностью $13 \cdot 10^5$ кА/м – чугун марки СЧ 24-44. Для последних материалов достаточно было задать значение намагниченности и соответствующие значения магнитного поле в области намагниченности насыщения. Для границ, разделяющих области с различными магнитными свойствами и для внешней границы модели, задавались условия Дирихле или Неймана. Когда свойства модели и граничные условия были заданы, строилась сетка треугольных конечных элементов (см. рис. 3) и производился расчет модели.

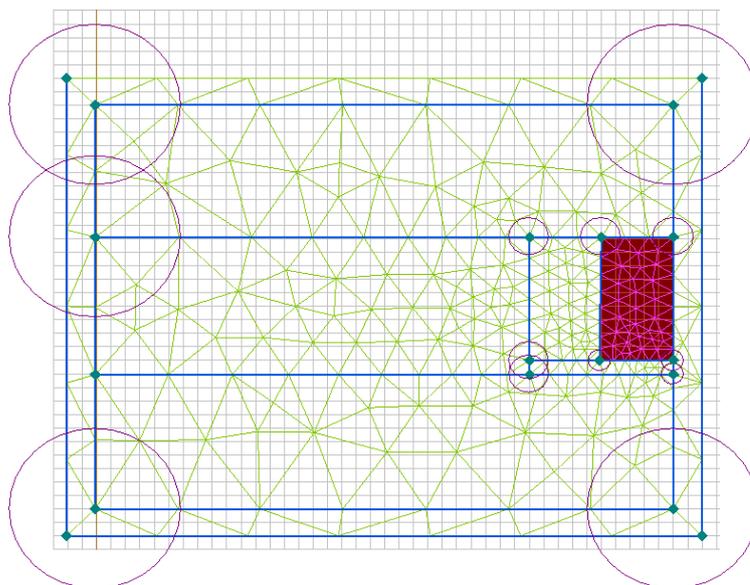


Рис. 3. Геометрическая модель магнитной системы с сеткой конечных элементов.

На рис. 4 представлены графики, показывающие изменение намагничивающего поля в рабочем воздушном зазоре вдоль и поперек силовых линий с началом отсчета от центра зазора (см. рис. 1). Напряженность магнитного поля в центре зазора (или измерительной ячейки) составляет 419 кА/м и значительно превосходит значения поля необходимого для намагничивания до насыщения магнитомягких материалов. Напряженность магнитного поля в продольном направлении проходит через максимум в центре зазора, а в поперечном направлении в центре наблюдается минимум напряженности. Неоднородность магнитного поля в рабочем зазоре прибора $\Delta H / H < 0,1 \%$, что согласно

международным стандартам на магнитные измерения много меньше допустимого значения равного 1%. Применительно к магнитным наножидкостям высокая однородность поля необходима для исключения перераспределения по объему дисперсных магнитных частиц под действием магнитных сил, величина которых пропорциональна градиенту магнитного поля.

Следствием слабой неоднородности намагничивающего магнитного поля является неоднородность индукции магнитного поля вдоль исследуемого образца (см. рис. 5). Для сильномагнитных материалов (чугун) неоднородность индукции магнитного поля достигает 0,3%, а для слабомагнитных материалов (магнитная наножидкость) – 0,1%.

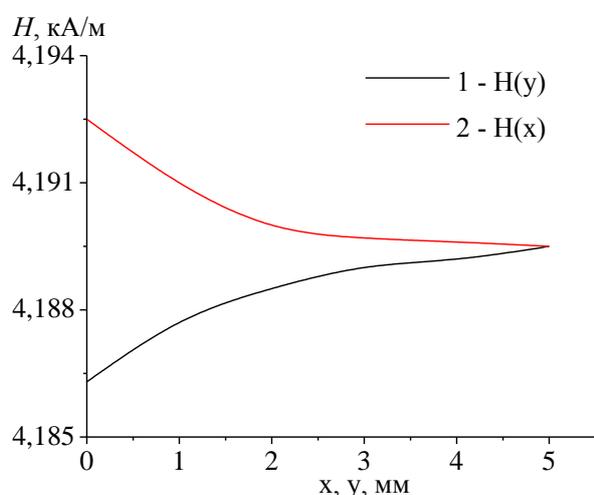


Рис. 4. Изменение напряженности магнитного поля в рабочем зазоре магнитной системы прибора (отсчет от центра рабочего зазора). 1 – вдоль силовых линий, 2 – поперек силовых линий.

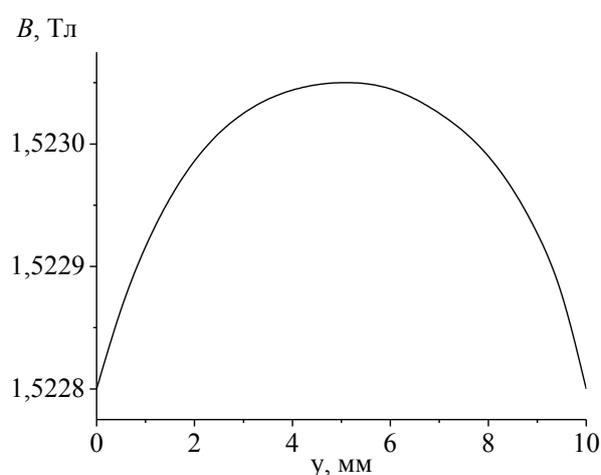


Рис. 5. Изменение индукции магнитного поля в образце из чугуна (вдоль силовых линий).

Учитывая небольшую неоднородность намагниченности исследуемых материалов в магнитном поле, все последующие погрешности определения магнитных характеристик проводились для материала находящегося в области центра магнитной наножидкости в кювете.

Измерения индукции магнитного поля в веществе производятся с помощью преобразователя Холла, установленного в паз магнитопровода (см. рис. 1) напротив центра образца. Немагнитная полость, образованная пазом, искажает первоначальную топографию магнитного поля и это приводит к методической погрешности измерения намагниченности. Преобразователи Холла, расположенные в пазе, фиксируют заниженное значение индукции магнитного поля.

Кроме того, изучалась методическая погрешность измерения

индукции магнитного поля в зависимости от поперечных размеров паза. На рис. 6 приведены графики относительной погрешности индукции магнитного поля $\Delta B/B$ в зависимости от глубины паза h для двух значений ширины паза. Величина погрешности $\Delta B/B$ резко возрастает при увеличении глубины паза. Отсюда становится понятно, что при постоянной глубине паза, равной толщине преобразователя Холла, ширину паза следует увеличивать вплоть до ширины образца (кривая 2 на рис. 6 отражает именно этот случай) или использовать специальные тонкопленочные преобразователи Холла. Особенно важно правильно выбрать размеры паза при исследовании свойств сильномагнитных материалов (см. рис. 6). Отдельную погрешность в измерение B в веществе вносит немагнитный зазор в магнитной цепи прибора, который образован медной стенкой кюветы. На рис. 6 (кривые 1, 2) показаны графики зависимости погрешности $\Delta B/B$ от толщины немагнитной щели. Погрешность очевидным образом зависит от намагниченности насыщения исследуемого материала. Для сильномагнитных материалов погрешность составляет несколько процентов при небольших зазорах, а для слабомагнитных доли процента. Для примера, при измерении свойств чугуна в цепи с содержащей зазор 1 мм погрешность $\Delta B/B$ возрастает до 11 %, при зазоре 2 мм до 21 %. Область на рис. 6 между линиями, выделенными красным цветом, показывает небольшой разброс погрешности $\Delta B/B$ для магнитных наножидкостей с намагниченностью в диапазоне от 10 кА/м до 50 кА/м.

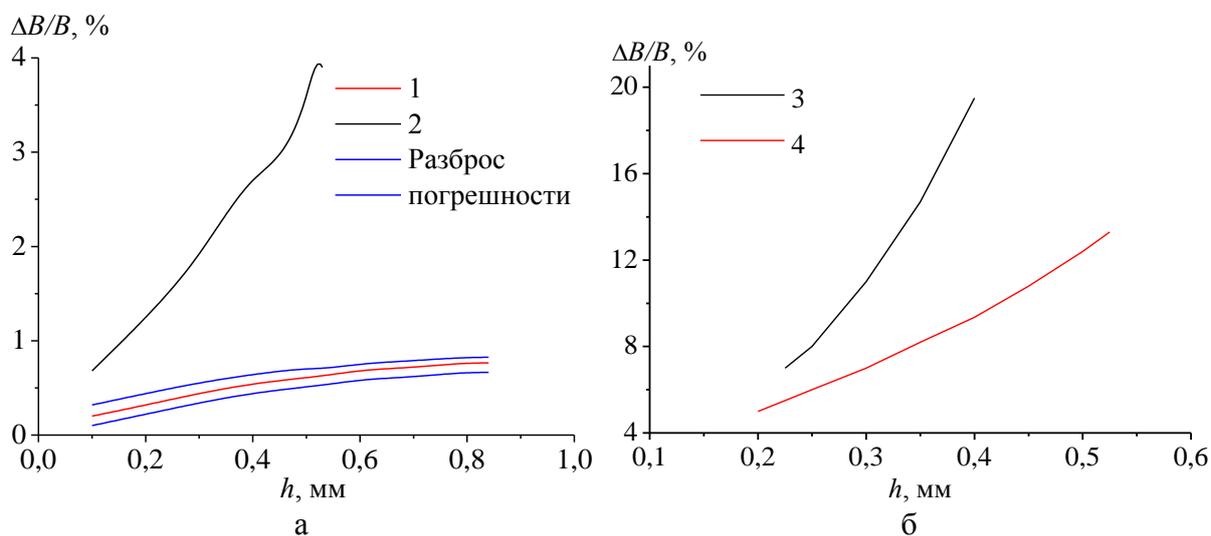


Рис. 6. Зависимость погрешности измерения индукции магнитного поля в веществе от величины воздушного зазора h : а – сплошной зазор между магнитопроводом и образцом магнитной наножидкости (1) или образцом из чугуна (2); б – зазор между магнитопроводом и чугунным образцом при ширине канавки под преобразователь Холла $l = 1$ мм (3) и $l = 2$ мм (4).

Остановимся на методической погрешности определения

напряженности намагничивающего магнитного поля, с помощью преобразователя Холла, установленного под образцом в плоскости среднего сечения. По мере удаления активной зоны преобразователя от поверхности образца l относительная погрешность напряженности магнитного поля $\Delta H/H$ нелинейно возрастает (см. рис. 7). Скорость увеличения погрешности $\Delta H/H$ зависит от магнитных свойств образца, но общий уровень ее не высокий. У преобразователей Холла серии ПХЭ 607 активная зона лежит на расстоянии $0,5 \pm 1$ мм и поэтому погрешность $\Delta H/H$ не превышает 1%. Кривые на рис. 6 при $l=0$ мм стремятся к некоторому конечному значению отличному от нуля. Это объясняется тем, что напряженность поля в центре образца меньше, чем на краю. Следует подчеркнуть, что все приведенные расчетные данные справедливы только для оговоренных форме и размерах исследуемых образцов, но общий характер зависимостей достаточно универсален.

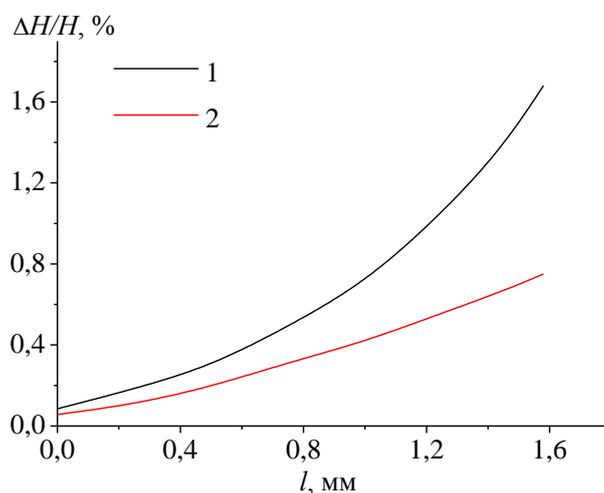


Рис. 7. Погрешность измерения напряженности магнитного поля в зависимости от расстояния l от образца до активной зоны преобразователя холла: 1 – чугун, 2 – магнитная наножидкость.

Используя графики на рис. 6 и 7 можно показать, что относительная методическая погрешность определения намагниченности магнитных наножидкостей на приборе МДМ-П1 не превышает $\Delta J/J \leq 1\%$. Небольшая величина методической погрешности прибора свидетельствует о том, что он имеет правильную конструкцию и схему измерений. Поправочный коэффициент k , входящий в формулу (2), для расчета действительного значения намагниченности равен $k \approx 1,01$, по опытным данным сравнительных измерений намагниченности на приборе МДМ-П1 и вибрационном магнитометре этот коэффициент имеет очень близкое значение $\approx 1,015$. Приведенные расчетные данные позволяют достаточно просто оценить методическую погрешность магнитометров имеющих такую же магнитную цепь как у рассматриваемого магнитометра МДМ-П1.

В частности, магнитометр может использоваться для изучения широкого круга материалов, включая новые перспективные магнитореологические жидкости с намагниченностью до 600 кА/м.

5. Заключение

Таким образом, разработана принципиальная измерительная схема и конструкция портативного прибора для экспресс-измерений намагниченности всех существующих лабораторных и промышленных магнитных наножидкостей. Установлено, что прибор имеет высокие метрологические показатели, что позволяет проводить точные измерения намагниченности с малыми затратами исследуемого материала. По результатам численного анализа модели магнитной системы прибора найдены зависимости методической ошибки измерения индукции магнитного поля в веществе и напряженности намагничивающего поля от размеров немагнитных полостей в магнитной цепи прибора и магнитных свойств исследуемых материалов. Подтверждено, что магнитное поле, воздействующее на исследуемые образцы материалов, имеет высокую степень однородности. Показано, что на базе описанного магнитометра могут быть разработаны достаточно точные приборы для измерения намагниченности даже сильномагнитных материалов, например магнитореологических жидкостей [12, 13].

Библиографический список:

1. **Орлов, Д.В.** Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин. – М.: Машиностроение, 1993. – 272 с.
2. **Болотов, А.Н.** Магнитные масла триботехнического назначения / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2009. – Вып. 1. – С. 5-9.
3. **Uhlmann, E.** Application of magnetic fluids in tribotechnical systems / E. Uhlmann, G. Spur, N. Bayat, R. Patzwald // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2002. – V. 252. – P. 336-340. DOI: 10.1016/S0304-8853(02)00724-2.
4. **Лебедев, А.В.** Дипольное взаимодействие частиц в магнитных жидкостях / А.В. Лебедев // Коллоидный журнал. – 2014. – Т. 76. – № 3. – С. 363-371.
5. **Чечерников, В.И.** Магнитные измерения / В.И. Чечерников. – М.: МГУ, 1969. – 388 с.
6. **Болотов, А.Н.** Смазочные свойства магнитных наножидкостей на основе эфиров карбоновых кислот / А.Н. Болотов, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2019. – Вып. 11. – С. 555-563. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.555.
7. **Полунин, В.М.** Акустические эффекты в магнитных жидкостях / В.М. Полунин. – М.: Физматлит, 2008. – 208 с.
8. **Пат. 2402032, Российская Федерация МПК G 01R 33/12.** Способ и устройство для измерения намагниченности жидкого вещества, в частности, магнитной жидкости / Перминов С.М., Перминова А.С.: заявитель и патентообладатель Ивановский

государственный энергетический университет. – № 2009101546/28; заявл. 19.01.2009; опубл. 20.10.2010, Бюл. № 29. – 8 с.

9. **Кассандров, О.Н.** Обработка результатов наблюдений / О.Н. Кассандров, В.В. Лебедев. – М.: Наука, 1970. – 102 с.

10. Elcut. Новый подход к моделированию полей. – Режим доступа: www.url:https://elcut.ru. – 20.02.2020.

11. Материалы магнитотвердые спеченные. Марки, технические требования и методы контроля: ГОСТ 21559-76; введен 01.07.1977. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 15 с. – Внесены изменения, опубликованные в Информационном указателе стандартов: № 12 за 1982 год, № 8 за 1987 год, № 5 за 1991 год.

12. **Wereley, N.M.** Magnetorheology: Advances and Applications / N.M. Wereley // In series: Smart Materials Series (Book 6). – Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry, 2014. – 410 p. DOI: 10.1039/9781849737548.

13. **Ahamed, R.** A state of art on magneto-rheological materials and their potential applications / R. Ahamed, S.B. Choi, M.M. Ferdaus // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. – 2018. – V. 29. – I. 10. – P. 2051-2095. DOI: 10.1177/1045389X18754350.

References:

1. **Orlov, D.V.** Magnitnye zhidkosti v mashinostroenii [Magnetic fluids in mechanical engineering] / D.V. Orlov, Yu.O. Mikhalev, N.K. Myshkin. – М.: Mashinostroenie, 1993. – 272 p. (In Russian).

2. **Bolotov, A.N.** Magnitnye masla tribotekhnicheskogo naznacheniya [Tribotechnical magnetic oils] / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2009. – I. 1. – P. 5-9. (In Russian).

3. **Uhlmann, E.** Application of magnetic fluids in tribotechnical systems / E. Uhlmann, G. Spur, N. Bayat, R. Patzwald // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2002. – V. 252. – P. 336-340. DOI: 10.1016/S0304-8853(02)00724-2.

4. **Lebedev, A.V.** Dipole interparticle interaction in magnetic fluids / A.V. Lebedev // Colloid Journal. – 2014. – V. 76. – № 3. – P. 334-341.

5. **Chechernikov, V.I.** Magnitnye izmereniya [Magnetic measurements] / V.I. Chechernikov. – М.: MSU, 1969. – 388 p. (In Russian).

6. **Bolotov, A.N.** Smazochnye svoystva magnitnykh nanozhidkosti na osnove ehfirov karbonovykh kislot [Lubrication properties of magnetic nanoliquids based on carboxylic acids] / A.N. Bolotov, O.O. Novikova // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2019. – I. 11. – P. 555-563. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.555. (In Russian).

7. **Polunin, V.M.** Akusticheskie ehffekty v magnitnykh zhidkostyakh [Acoustic effects in magnetic fluids] / V.M. Polunin. – М.: Fizmatlit, 2008. – 208 p. (In Russian).

8. **Pat. 2402032, Russian Federation IPC G 01R 33/12.** Method and device for measuring the magnetization of a liquid substance, in particular magnetic fluid / Perminov S.M., Perminova A.S.: applicant and patent holder Ivanovo State Power Engineering University. – № 2009101546/28; appl. 19.01.2009; publ. 20.10.2010, I. № 29. – 8 p. (In Russian).

9. **Kassandrov, O.N.** Obrabotka rezul'tatov nablyudenii [Processing observation results] / O.N. Kassandrov, V.V. Lebedev. – М.: Nauka, 1970. – 102 p. (In Russian).

10. Elcut. Novyi podkhod k modelirovaniyu polei [A new approach to modeling fields]. – Access mode: www.url:https://elcut.ru. – 20.02.2020.

11. Materialy magnitotverdye spechennye. Marki, tekhnicheskie trebovaniya i metody

kontrolya [Materials magnetically hard sintered. Marks, technical requirements and control methods]: GOST 21559-76; vveden 01.07.1977. – M.: Izd-vo standartov, 1978. – 15 p. – Changes published in Standards Information Index: № 12 in 1982, № 8 in 1987, № 5 in 1991. (in Russian).

12. **Wereley, N.M.** Magnetorheology: Advances and Applications / N.M. Wereley // In series: Smart Materials Series (Book 6). – Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry, 2014. – 410 p. DOI: 10.1039/9781849737548.

13. **Ahamed, R.** A state of art on magneto-rheological materials and their potential applications / R. Ahamed, S.B. Choi, M.M. Ferdaus // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. – 2018. – V. 29. – I. 10. – P. 2051-2095. DOI: 10.1177/1045389X18754350.

Original paper

MOBILE MAGNETOMETER FOR RAPID TEST OF SATURATION MAGNETIZATION OF MAGNETIC NANOFLUIDS

A.N. Bolotov, O.O. Novikova

Tver State Technical University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.557

Abstract: The work is aimed at creating a magnetometric device for accurate determining the saturation magnetization of magnetic nanofluids and similar properties of functional dispersed materials. The device is based on a magnetometric method with the Hall induction transducers, improved taking into account the peculiarities of the physical and mechanical properties of liquids. The measuring magnetic system of the device is designed in such a way that with the help of permanent magnets it is possible to create a uniform magnetizing field up to $(2 \div 4) \cdot 10^5$ A/m in a working gap where the cuvette with the studied magnetic nanofluid is installed. Under the cuvette with a magnetic nanofluid in its middle section is a Hall Converter, which serves to measure the strength of the magnetizing magnetic field. The second Hall Converter, designed to measure the magnetic field induction in a substance, is installed in a rectangular groove and is located in the center of the magnetic nanofluid in the cuvette. The relative error of measuring the magnetization on the device did not exceed 2 % for magnetic nanofluids with a magnetization in the range from 10 kA / m to 50 kA/m. The created device can be used for Express measurements in laboratory and industrial conditions and does not require special professional skills. It is shown that the additive component of the instrumental measurement error depends on the values of the residual voltage (nonequipotential EMF), side galvanomagnetic effects and thermo - EMF of the measuring Converter. The multiplicative component is related to the time and temperature instability of the conversion coefficient and the current or voltage supply. The methodic error of the magnetometer is caused by the fact that not a fully closed magnetic circuit is used for measuring the magnetic field induction. It is shown that the device meets international standards for magnetic measurements of soft magnetic materials in terms of their metrological parameters. The device allowed us to determine the magnetization of colloidal systems in magnetic fields of a start paraprocess, individual magnetization of nanoparticles of the dispersed phase, the aggregative stability of colloids in magnetic and gravity fields to estimate the size of the solvation shell of the nanoparticles.

Keywords: magnetic nanofluid, saturation magnetization, Hall converters, magnetic system, measurement error, numerical simulation.

Болотов Александр Николаевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Новикова Ольга Олеговна – к.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Alexander N. Bolotov – Dr. Sc., Professor, Head of the Applied Physics Department, Tver State Technical University

Olga O. Novikova – Ph. D., Docent, Docent of the Applied Physics Department, Tver State Technical University

Поступила в редакцию/received: 10.04.2020; после рецензирования/ revised: 15.05.2020; принята/accepted 20.05.2020.