

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна
Должность: проректор по учебной работе
Дата подписания: 15.05.2022 00:05:48
Уникальный программный ключ:
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf75e945df4a4851fda56d089

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра нанотехнологий и инженерной физики



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

2017г.

НАНО- И МИКРОДИСПЕРСНЫЕ МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
для студентов направления подготовки
28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»

Курск 2017

УДК 53.05

Составители: П.А. Ряполов, А.М. Стороженко, В.М. Полунин
И.А. Шабанова

Рецензент

Кандидат физико-математических наук, доцент *А.Е. Кузько*

Нано- и микродисперсные магнитные системы: методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов направления подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»/ Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: П.А. Ряполов, А.М. Стороженко, В.М. Полунин, И.А. Шабанова – Курск, 2017. – 42 с.: Библиогр.: с. 22,35,42.

Излагаются методические указания по выполнению лабораторных работ, в которых проводится измерение магнитного поля в намагничивающихся дисперсных системах, определение структурных параметров нанодисперсной магнитной жидкости с помощью магнитогранулометрического анализа, рассматривается азимутальная зависимость акустомагнитного эффекта в нанодисперсной магнитной жидкости.

Методические указания соответствуют требованиям Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования и учебного плана направления подготовки 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника, степень (квалификация) – бакалавр. Материал предназначен для студентов направления подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника», а также будет полезен студентам всех других направлений подготовки, изучающих дисциплины нанотехнологического профиля.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *17.11.17* Формат 60 x 84 1/16.
Усл. печ. л. 2,44. Уч.-изд. л. 2,2. Тираж 50 экз. Заказ *2007* Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Содержание

Лабораторная работа №1 <i>«Измерение магнитного поля в намагничивающихся дисперсных системах»</i>	4
Лабораторная работа №2 <i>«Определение магнитных моментов и размеров наночастиц магнитогранулометрическим методом»</i>	23
Лабораторная работа №3 <i>«Азимутальная зависимость акустомагнитного эффекта в нанодисперсной магнитной жидкости»</i>	36

Измерение магнитного поля в намагничивающихся дисперсных системах

Цель работы: ознакомление с физическими основами и методикой измерений магнитных полей в вакууме – в межполюсном пространстве, а также в намагничивающихся дисперсных системах.

Приборы и принадлежности: микровеберметр Ф-199 Ленинград м/с Прибор По-110; миллитесламетр портативный универсальный ТПУ, электромагнит ФЛ-1 Москва главснаб ПО-716, баллистический гальванометр, плоские и кольцевые постоянные магниты, образцы твердых и жидких ферромагнетиков.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

1. Величины, характеризующие магнитное поле в вакууме и веществе

Частицы с электрическими зарядами (положительными и отрицательными) постоянно наблюдаются в природе, они создают в окружающем пространстве кулоновское электрическое поле. Магнитные же заряды (ни положительные, ни отрицательные) никогда не наблюдались по отдельности. Магнит всегда имеет два равных по величине полюса на двух своих концах - северный и южный, и магнитное поле вокруг него является результирующим полем обоих полюсов. Гипотезы о существовании магнитных зарядов (магнитных монополей) не имеют экспериментальных подтверждений, хотя ими можно воспользоваться для установления законов в магнитостатике. Для исследования магнитных полей, т.е. для измерения механических воздействий магнитных полей на движущиеся в них электрические заряды, выбирают так

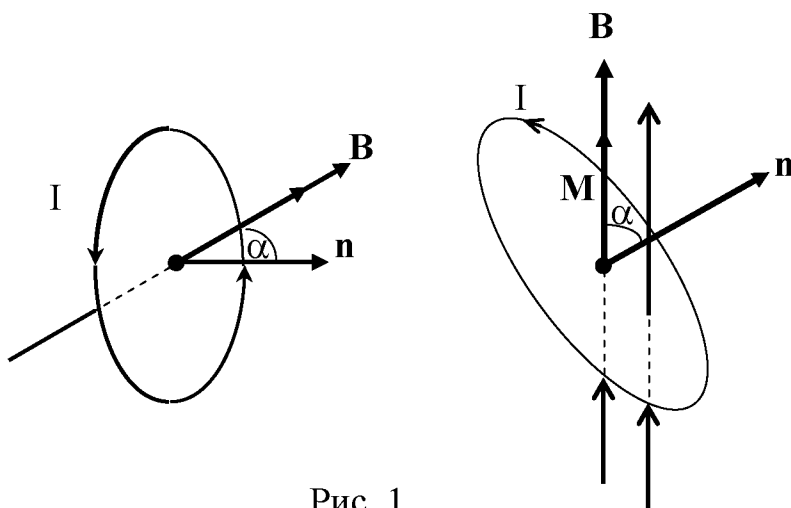


Рис. 1

называемый пробный ток, существующий в плоском замкнутом контуре малых размеров (круговой ток). Положение этого контура в пространстве определяется с помощью положительной нормали \mathbf{n} , связанной с током в контуре правилом правого винта (рисунок 1).

При внесении такого контура с током в магнитное поле на него действует вращающий момент, стремящийся повернуть его так, чтобы направление положительной нормали \mathbf{n} совпало с направлением магнитного поля в данном месте пространства. Величина этого вращающего момента стремится к максимуму при $\alpha \rightarrow \pi/2$ и к минимуму при $\alpha \rightarrow 0$. Угол α - угол между направлением положительной нормали \mathbf{n} и направлением магнитного поля. Кроме того, величина этого момента зависит как от свойств контура, так и от свойств среды, в которой существует магнитное поле.

Свойства контура в основном определяются векторной физической величиной магнитным моментом \mathbf{p}_m , численное значение которого равно

$$\mathbf{p}_m = IS, \quad (1)$$

где I - величина тока в контуре, S – площадь, охватываемая контуром.

Направление магнитного момента контура связано с направлением тока в нем правилом правого винта.

Численное значение вращающего момента, действующего на пробный контур в магнитном поле, пропорционально магнитному моменту контура и синусу угла α :

$$M_{вр} \sim p_m \cdot \sin \alpha. \quad (2)$$

Следовательно, на пробные контуры с различными значениями \mathbf{p}_m со стороны поля действуют различные по величине вращающие моменты $M_{вр}$.

Однако оказывается, что отношение максимального вращающего момента M_{max} , действующего на пробный контур со стороны магнитного поля, к магнитному моменту контура \mathbf{p}_m для любых контуров, помещенных в данную точку поля, остается величиной постоянной. Следовательно, оно может служить характеристикой магнитного поля.

Эту величину называют индукцией магнитного поля \mathbf{B} . Индукция магнитного поля \mathbf{B} связана с вращающим моментом $M_{вр}$ соотношением

$$M_{вр} = k p_m B \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

где k - коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц измерения физических величин.

При $k = 1$

$$M_{\text{вр}} = p_m B \cdot \sin \alpha. \quad (4)$$

Формула (4) – это модуль векторного произведения:

$$\vec{M}_{\text{вр}} = [\vec{p}_m \times \vec{B}]. \quad (5)$$

Из соотношения (4)

$$B = \frac{M_{\text{вр}}}{p_m \cdot \sin \alpha}. \quad (6)$$

При $p_m = 1$ и $\sin \alpha = 1$ имеем $|B| = |M_{\text{вр}}|$, т.е. индукция магнитного поля численно равна вращающему моменту, действующему на пробный контур, помещенный перпендикулярно к направлению магнитного поля в данную точку, магнитный момент которого равен единице. Таким образом, индукция магнитного поля характеризует силовое воздействие магнитного поля на ток (движущиеся электрические заряды).

Помимо макротоков, представляющих собой упорядоченное движение электрических зарядов в объеме проводника, в любом веществе существуют микротоки, возникновение которых можно объяснить наличием в атомах вещества электронов, вращающихся вокруг ядер с большой скоростью ($\sim 10^{15} \text{ с}^{-1}$). Поэтому можно считать, что заряд и масса равномерно распределены по орбите электронов, т.е. движение каждого электрона эквивалентно замкнутому контуру с током. Тогда любой атом, любую молекулу вещества можно рассматривать как совокупность микротоков. Микротоки вещества создают свое собственное магнитное поле и взаимодействуют с внешним магнитным полем.

На основании принципа суперпозиции магнитных полей (по аналогии с принципом суперпозиции электрических полей) в пространстве может существовать результирующее магнитное поле макро- и микротоков.

Индукция магнитного поля B (магнитная индукция) является характеристикой этого результирующего поля. Поэтому при прочих равных условиях и одном и том же макротоке в проводнике величина B в различных средах различна.

Для характеристики магнитных полей, порождаемых только макротоками, вводится физическая величина, называемая напряженностью магнитного поля H . Единица измерения напряженности магнитного поля $[H] = \text{А/м}$. Магнитное поле в веществе описывается вектором магнитной индукции B , $[B] = \text{Тл}$ (Тесла).

Напряженность магнитного поля \mathbf{H} для неферромагнитных материалов связана с магнитной индукцией \mathbf{B} соотношением

$$\mathbf{B} = \mu\mu_0\mathbf{H}, \quad (7)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная вакуума, μ - относительная магнитная проницаемость среды. Для вакуума (приблизительно и для воздуха) $\mu = 1$.

Относительная магнитная проницаемость среды показывает, во сколько раз магнитное поле макротокков усиливается за счет магнитных полей микротокков.

Графически магнитные поля изображают с помощью силовых линий векторов \mathbf{B} или \mathbf{H} - линий, проведенных в пространстве, касательная к которым в данной точке совпадает с направлением векторов \mathbf{B} или \mathbf{H} в данной точке. Существенным отличием силовых линий магнитного поля от силовых линий электростатического поля является то, что они всегда замкнуты.

Магнитный момент единицы объема вещества представляет собой намагниченность M_H , $[M_H] = \text{А/м}$.

Соотношение (7) можно представить иначе:

$$\mathbf{B} = \mu_0(1+\chi)\mathbf{H} = \mu_0(\mathbf{H}+M_H), \quad (8)$$

где χ – магнитная восприимчивость вещества.

Таким образом, $M_H = \chi H$ (уравнение магнитного состояния).

Параметр χ изменяет свое численное значение в процессе намагничивания вещества. В слабых полях (в начале кривой намагничивания) χ представляет собой так называемую начальную восприимчивость. При увеличении \vec{H} магнитомягкий ферромагнетик намагничивается до насыщения, т.е. M_H принимает для данного материала максимальное значение M_S (намагниченность насыщения).

Для характеристики вещества в различных по величине магнитных полях вводят понятие дифференциальной магнитной восприимчивости

$$\chi_{\text{диф}} = \frac{\Delta M}{\Delta H}.$$

В полях, близких к насыщению, $\chi_{\text{диф}} \rightarrow 0$.

Степень намагничивания сильномагнитных веществ зависит не только от величины магнитной проницаемости, но и от их геометрической формы. При намагничивании внесенного во внешнее поле сильномагнитного тела, имеющего конечные размеры, на обеих его торцевых поверхностях возникают магнитные полюса («магнитные заряды» противоположного знака), что обуславливает появление поля в веществе противоположного направления (размагничивающее поле \vec{H}'). Магнитная поляризация вещества проиллюстрирована рисунком 2.

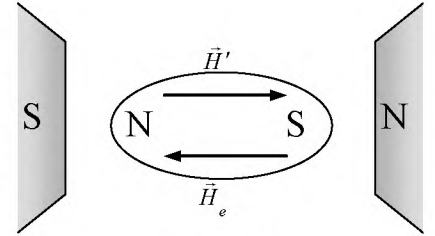


Рис. 2

Напряженность поля \vec{H}' пропорциональна намагниченности M_H , поэтому можно написать

$$\vec{H}' = N \cdot M_H,$$

где N — коэффициент пропорциональности, который называют размагничивающим фактором.

Результирующее поле в веществе H_i получим как

$$H_i = H_e - NM_H.$$

В общем случае коэффициент N является тензором, однако для изотропного магнетика его величина зависит только от формы магнетика. Так, при намагничивании очень длинного тонкого стержня вдоль его оси коэффициент N почти равен нулю, и, наоборот, в случае коротких и толстых образцов значение $N \approx 1$.

При намагничивании тел «неправильной формы» распределение размагничивающего поля в них неоднородно, т.е. его величина и направление изменяются от точки к точке. В подобных случаях расчет размагничивающего фактора трудно осуществить. Строгий и точный расчет возможен только для магнетиков в форме эллипсоидов. Так, в случае намагничивания тонкого вытянутого эллипсоида вращения (с круговым поперечным сечением) вдоль его длинной оси имеем

$$N = \frac{1}{k^2 - 1} \left\{ \frac{k}{\sqrt{k^2 - 1}} \ln \left(k + \sqrt{k^2 - 1} \right) - 1 \right\}, \quad (9)$$

где k — отношение размеров эллипсоида (длины к диаметру). В частности, при $k \gg 1$

$$N = \frac{1}{k^2} (\ln 2k - 1). \quad (10)$$

С другой стороны, намагничивая сплюснутый эллипсоид вращения в виде диска вдоль его длинной оси и принимая за k отношение диаметра эллипсоида к его толщине, получаем

$$N = \frac{1}{2} \left\{ \frac{k^2}{(k^2 - 1)^{3/2}} \sin^{-1} \frac{\sqrt{k^2 - 1}}{k} - \frac{1}{k^2 - 1} \right\}. \quad (11)$$

Расчетные числовые значения размагничивающего фактора для вытянутого и сплюснутого эллипсоидов вращения, а также экспериментально найденные значения N для круглого стержня при различных k представлены в табл. 1.

Таблица 1

Изменение размагничивающего фактора
в зависимости от отношения размеров тела

Отношение размеров	Круглый стержень	Вытянутый эллипсоид вращения	Сплюснутый эллипсоид вращения
1	0,27	0,333 3	0,333 3
2	0,14	0,173 5	0,236 4
5	0,040	0,055 8	0,124 8
10	0,017 2	0,020 3	0,069 6
20	0,006 17	0,006 75	0,036 9
50	0,001 29	0,001 44	0,014 72
100	0,000 36	0,000 430	0,007 76
200	0,000 090	0,000 125	0,003 90
500	0,000 014	0,000 023 6	0,001 567
1000	0,000 003 6	0,000 006 6	0,000 784
2000	0,000 000 9	0,000 001 9	0,000 392

В случае эллипсоида общего вида формула для N имеет сложный вид, однако между размагничивающими факторами вдоль трех главных осей эллипсоида x , y и z существует простое соотношение:

$$N_x + N_y + N_z = 1. \quad (12)$$

Учитывая его, можно легко найти N для некоторых частных случаев высокосимметричных эллипсоидов. Так, например, в шаре все три оси эквивалентны ($N_x = N_y = N_z$), поэтому из (12) сразу получаем

$$N = \frac{1}{3}. \quad (13)$$

При поперечном намагничивании длинного круглого стержня размагничивающий фактор вдоль его оси N_z будет равен нулю, и из очевидного условия, что $N_x = N_y$ вытекает

$$N = \frac{1}{2}. \quad (14)$$

При намагничивании плоскости в направлении ее нормали, вдоль которой выбрана ось z , имеем $N_x = N_y = 0$, откуда следует

$$N = 1. \quad (15)$$

2. Баллистический метод измерения магнитных величин

2.1. Баллистический гальванометр

Баллистический гальванометр относится к приборам магнито-электрической системы. В зеркальном гальванометре (рисунок 3) подвижная рамка 4 подвешивается в магнитном поле постоянного магнита на тонкой упругой ленточке-подвесе 1 толщиной в несколько микрометров. Для усиления магнитного поля, в котором находится рамка, в нее помещают железный цилиндрический сердечник 5. Ток к рамке подводится через подвес 1 и тонкую металлическую нить 6, оттягивающую снизу подвижную систему. К подвесу вблизи рамки крепится легкое зеркало 2. Луч света, идущий от осветителя, падает на зеркало и, отражаясь, попадает на шкалу с делениями. Чем дальше шкала от прибора, тем больше его чувствительность к току, поэтому цена деления шкалы зеркальных гальванометров указывается обычно для определенного расстояния зеркала от шкалы, например $2 \cdot 10^{-9}$ А/мм. Это справедливо, если шкала имеет миллиметровые деления и находится от гальванометра на расстоянии 1 м.

Рассмотрим соотношение, связывающее угол поворота рамки φ с величиной смещения светового штриха по шкале n и расстоянием от шкалы до зеркала l . Луч света от источника 1 падает на зеркало гальванометра 2. При повороте зеркала на угол φ отклонение луча от нулевого положения равно 2φ . Если световой штрих отклонится по шкале на n делений, а расстояние от зеркала до шкалы l (в метрах), то

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{n}{l}.$$

При небольших отклонениях рамки (до 4°) $\text{tg } 2\varphi \approx 2\varphi$ и $\varphi = \frac{n}{2l}$.

Для измерения количества электричества, протекающего через гальванометр при кратковременных одиночных импульсах тока длительностью τ , должно выполняться условие $\tau \ll T_0$, где T_0 — период собственных колебаний подвижной части гальванометра. Для выполнения этого условия увеличивают момент инерции подвижной части, утяжеляя ее (массивный диск 3 на рисунке 3). Такие гальванометры называются баллистическими.

Установим связь между углом отклонения рамки и количеством электричества, которое протекает через гальванометр. Можно записать следующее выражение для импульса момента силы, действующей на рамку при прохождении тока:

$$Mdt = \alpha i dt, \quad (16)$$

где i — мгновенное значение силы тока; α — коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции прибора.

Если τ — время прохождения тока по рамке, то, интегрируя (16), получим

$$\int_0^\tau Mdt = \int_0^\tau \alpha i dt = \alpha q. \quad (17)$$

Зная момент импульса $L = \int_0^\tau Mdt = \alpha q$, можно определить угловую скорость ω_τ , которую приобретает рамка к моменту времени τ :

$$\omega_\tau = \frac{L}{J} = \frac{\alpha q}{J}. \quad (18)$$

В опыте определяется не угловая скорость вращения, а угол поворота рамки. Найдем связь между этими величинами. Когда рамка доходит до первого максимального отклонения, ее кинетическая энергия превращается в потенциальную энергию подвеса рамки, закрученного на угол φ_τ . В этот момент имеем равенство

$$\frac{J\omega_\tau^2}{2} = \frac{D\varphi_m^2}{2}, \quad (19)$$

где D — коэффициент упругости подвеса.

Из (18) и (19) находим

$$q = \frac{1}{\alpha} \sqrt{JD} \varphi_m = b \varphi_m. \quad (20)$$

Таким образом, количество электричества, проходящего через гальванометр, пропорционально углу первого (максимального) отклонения, так называемого баллистического отброса рамки. Величина b — баллистическая постоянная данного гальванометра, определяется опытным путем.

2.2. Измерение индукции магнитного поля баллистическим методом

Описываемый метод был предложен профессором Московского университета А.Г.Столетовым и получил название *баллистического метода*. Он очень прост и удобен, позволяет с помощью простых экспериментальных средств получить надежные результаты.

В исследуемое магнитное поле помещается катушка, называемая измерительной, соединенная с баллистическим гальванометром. Размер катушки зависит от степени неоднородности магнитного поля. Чем больше неоднородность поля, тем меньшей должна быть катушка для более точного измерения поля в данной точке. Измерительная катушка с подключенным к ней баллистическим гальванометром представляет собой прибор, называемый *флюксметром*.

При измерениях катушку флюксметра ориентируют перпендикулярно к направлению линий магнитной индукции. Тогда магнитный поток через катушку будет равен:

$$\Phi = BSN, \quad (21)$$

где S — площадь сечения одного витка катушки, N — число ее витков, B — индукция поля в месте расположения катушки.

Если измерительную катушку повернуть на 90° или вынуть из поля (можно выключить ток, создающий магнитное поле), то магнитный поток через катушку станет равным нулю. При изменении магнитного потока через катушку от Φ до 0 в ней возникнет электродвижущая сила индукции

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -NS \frac{dB}{dt}. \quad (22)$$

ЭДС индукции не будет оставаться постоянной в течение всего времени убывания магнитного потока, поэтому индукционный ток i также не будет постоянен. Он будет увеличиваться от 0 до некоторого максимального

значения, а затем снова убывать до 0. Это приведет к возникновению в рамке гальванометра и в измерительной катушке ЭДС самоиндукции, равной

$$\varepsilon_s = -L \frac{di}{dt}, \quad (23)$$

где L — коэффициент самоиндукции всей цепи флюксметра.

Так как ЭДС самоиндукции численно равна падению напряжения на чисто индуктивном сопротивлении цепи, то на основании второго закона Кирхгофа можно записать

$$-NS \frac{dB}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt}, \quad (24)$$

где R — активное сопротивление всей цепи флюксметра. Интегрируя выражение (24) за время τ прохождения импульса индукционного тока, получим

$$-NS \int_0^{\tau} \frac{dB}{dt} dt = R \int_0^{\tau} i dt + \int_0^{\tau} L \frac{di}{dt} dt. \quad (25)$$

За время τ индукция магнитного поля убывает от B до 0, а индукционный ток, как отмечалось выше, равен нулю в начале и в конце процесса убывания магнитного поля, т.е. $i_{\text{нач}} = i_{\text{кон}}$. Поэтому выражение (25) переписывается в виде

$$NSB = Rq,$$

где q — количество электричества, прошедшего через гальванометр за время τ . Из последнего выражения находим

$$B = \frac{Rq}{NS}. \quad (26)$$

Если известна баллистическая постоянная гальванометра b , то заряд можно найти по формуле $q = bn_m/2l$, где n_m — максимальное отклонение «зайчика» по шкале гальванометра (максимальный отброс), l — расстояние от зеркала гальванометра до экрана. Это позволяет представить формулу (26) в виде

$$B = \frac{n}{2NSl} \frac{Rb}{m} \quad (27)$$

или

$$B = \beta n_m, \quad (28)$$

где $\beta = \frac{Rb}{2NSl}$ — некоторая постоянная величина для конкретной экспериментальной установки. Ее численное значение можно найти, зная технические данные установки R , b , N , S и l . Однако для выполнения относительных измерений (например, измерений распределения магнитного поля по поверхности постоянного магнита) можно принять значение максимального поля за 1. Если при этом максимальное отклонение «зайчика» составляет n_0 , то

$$\frac{B}{B_{\max}} = \frac{n_m}{n_0}. \quad (29)$$

3. Теслометр Холловского типа

Физическая сущность эффекта Холла

Рассмотрим проводник в форме прямоугольной пластины толщиной d , по которой протекает ток плотностью i (рисунок 4). Эквипотенциальными поверхностями внутри пластины будут плоскости, перпендикулярные к направлению тока \vec{i} , и поэтому при отсутствии магнитного поля разность потенциалов между двумя зондами, лежащими в одной из этих плоскостей, будет равна нулю.

Если включить магнитное поле с индукцией B перпендикулярно к \vec{i} и зондам, то между ними возникнет разность потенциалов. Возникновение этой разности потенциалов и есть *эффект Холла*.

Опыт показывает, что разность потенциалов

$$U = X \cdot d \cdot i \cdot B, \quad (30)$$

где X - постоянная Холла.

Эффект Холла является следствием существования силы Лоренца $f_{\text{Л}} = evB$. Внутри пластинки возникает поперечное электрическое поле с напряженностью E , причем при равновесии $evB = eE$. Поэтому $U = E \cdot d = d \cdot v \cdot B$. С другой стороны $i = env$, т. е. $v = \frac{i}{en}$. Поэтому $U = \frac{1}{en} d \cdot i \cdot B$, откуда следует $X = \frac{1}{e \cdot n}$.

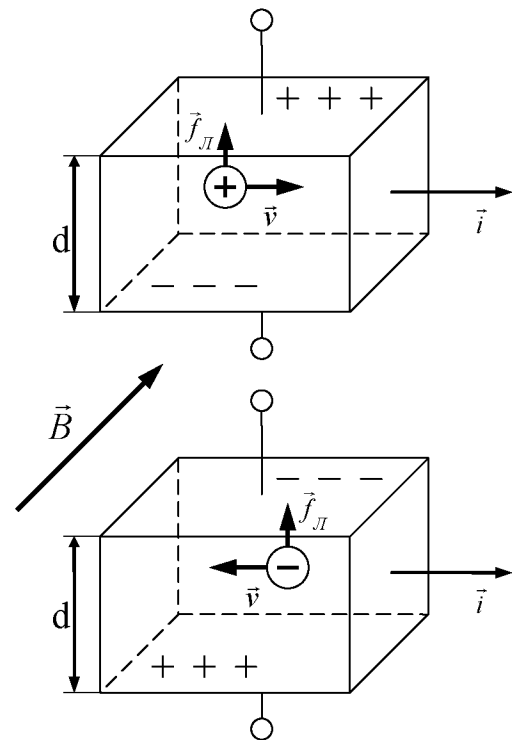


Рис. 4

Между холловской ЭДС U и магнитной индукцией B согласно (30) существует линейная зависимость, поэтому эффект Холла может быть применен для измерения индукции (напряженности) магнитного поля (датчики Холла).

4. Микровеберметр Ф199

По принципу действия микровеберметр представляет собой усилитель постоянного тока, охваченный цепью отрицательной обратной связи, благодаря чему осуществляется интегрирование входного сигнала, т.е. измерение электрического заряда, протекающего по цепи флюксметра.

Порядок работы с микровеберметром

Работая с микровеберметром, соблюдайте указания мер безопасности. Если не известна величина входного сигнала, начинайте измерения с наиболее грубых диапазонов, переходя последовательно на более чувствительные, до тех пор, пока величина измеряемого сигнала будет составлять не менее 30% от конечного значения диапазона.

Для измерения входного сигнала выполните следующие операции:

- подсоедините концы входного соединительного шнура к измеряемой цепи;
- установите требуемый диапазон измерения;
- проверьте совпадение риски светового указателя с нулевой отметкой шкалы при включённой кнопке АРР;
- установив риску светового указателя на нулевую отметку при нажатой кнопке НУЛЬ и выключенной кнопке АРР (вращением ручек ГРУБО и ТОЧНО при включенной кнопке КОМПЕНСАЦИЯ);
- нажмите кнопку ИЗМЕРЕНИЕ, подайте входной сигнал и произведите отсчет;
- верните кнопку ИЗМЕРЕНИЕ в исходное положение, нажав кнопку НУЛЬ.

Не оставляйте кнопку ИЗМЕРЕНИЕ нажатой дольше, чем нужно для отсчета. Вследствие сползания, особенно на чувствительных диапазонах измерения, указатель уходит за пределы шкалы и возникают значительные перегрузки измерительного механизма отсчетного устройства.

С целью уменьшения погрешности, обусловленной сползанием указателя, время от момента нажатия кнопки ИЗМЕРЕНИЕ до момента отсчета должно быть минимальным, особенно на чувствительных диапазонах измерения.

В отдельных случаях целесообразно производить пробное измерение, добиваясь ручками ГРУБО и ТОЧНО уменьшения сползания указателя в отклоненном входным сигналом положении, при нажатой кнопке ИЗМЕРЕНИЕ.

Для отсчета произведите повторное измерение, не изменяя положение ручек ГРУБО и ТОЧНО.

Для удобства работы в условиях сильных помех, вызывающих повышенное сползание указателя, а также при измерениях в баллистическом режиме, рекомендуется использовать запоминающее устройство микровеберметра. При этом выполняйте операции в следующем порядке;

- нажмите кнопку НУЛЬ и установите указатель на нулевую отметку ручками ГРУБО, ТОЧНО;

- нажмите кнопку ИЗМЕРЕНИЕ и сразу же подайте входной сигнал;

- слегка нажав кнопку НУЛЬ, верните кнопку ИЗМЕРЕНИЕ в исходное положение так, чтобы кнопка НУЛЬ тоже осталась в исходном положении. При этом запоминающее устройство отключится от усилителя и зафиксирует сигнал, поступавший на него в момент отключения;

- произведите отсчет по шкале отсчетного устройства.

Сползание указателя, обусловленное собственно запоминающим устройством, очень мало и в нормальных условиях не превышает 0,002%/с. Поэтому, при всех измерениях, где не требуется непрерывное интегрирование входного сигнала, целесообразно использовать запоминающее устройство. Помните, что сигнал с запоминающего устройства поступает только на отсчетное устройство (микроамперметр М1633), а на клеммах U, T напряжение и ток равна нулю. При нажатии кнопок НУЛЬ или ИЗМЕРЕНИЕ происходит сброс показаний запоминающего устройства, а микровеберметр переходит в соответствующий режим работы.

Не оставляйте разомкнутой входную цепь микровеберметра, так как это вызовет быстрый уход указателя за пределы шкалы и перегрузку измерительного механизма отсчетного устройства.

Отключение микровеберметра:

- выключите СЕТЬ;

- включите кнопку АРР;

- выключите кнопку КОМПЕНСАЦИЯ;

- кнопку НУЛЬ оставьте нажатой;

- отсоедините последовательно входной соединительный шнур, сетевой соединительный шнур от сети питания и от микровеберметра, провод заземления от корпуса.

После проведения указанных операций микровеберметр отключен полностью. При кратковременных перерывах достаточно провести три первых операции.

5. Визуальное изучение магнитного поля

Наиболее эффективное визуальное изучение магнитного поля осуществляется с применением магнитных жидкостей.

Синтезированные в середине 60-х годов XX века жидкие ферромагнетики – магнитные жидкости (МЖ) представляют собой коллоидные растворы различных ферро- или ферримангнитных веществ в обычных жидкостях. Наиболее распространенной является МЖ на основе однодоменных частиц магнетита Fe_3O_4 , диспергированных в керосине. Агрегативная устойчивость коллоида достигается путем создания на поверхности частиц защитных оболочек, препятствующих слипанию частиц в агрегаты. Наиболее часто в качестве стабилизатора применяется олеиновая кислота.

В поперечном к свободной поверхности МЖ магнитном поле возникает скачок «магнитного давления», обуславливающий неустойчивость поверхности, появление на ней системы «пиков», приближенно отражающих геометрию линий напряженности. Подобная неустойчивость возникает при достижении некоторого критического значения поперечной составляющей магнитного поля H_k . В случае керосиновой МЖ $H_k=10-15$ кА/м.

Для визуального изучения геометрии магнитного поля используется специальная кювета с плоским тонкостенным доньшком, покрытым тонким слоем магнитного коллоида. Постоянный магнит, поле которого исследуется, подносится к кювете снизу, прижимается к доньшку или удерживается на некотором расстоянии от него.

6. Методика измерения намагниченности магнитного коллоида или ферросуспензии

Основой индукционного метода служит закон электромагнитной индукции, согласно которому ЭДС индукции, возникающая в проводящем контуре, численно равна скорости изменения магнитного потока,

пронизывающего данный контур. Различные варианты данного метода используются для измерения напряженности магнитного поля, градиента напряженности, для измерения намагниченности МЖ и ФС, а также для измерения остаточной намагниченности ФС.

Исследуемая жидкость заливается в цилиндрическую ампулу, диаметр и высота которой составляют 6 и 30 мм. Продольное намагничивание образцов проводится либо внутри соленоида, предварительно проградуированного то току, либо – между полюсными наконечниками лабораторного электромагнита. Намагниченность или остаточная намагниченность определялась баллистическим методом (или при помощи микроампервеберметра) по фиксации изменения магнитного потока, пронизывающего витки измерительной катушки при выдергивании из нее намагниченного образца. В наиболее простом случае измеряется магнитный поток, пронизывающий витки катушки при включении или выключении внешнего магнитного поля с исследуемым образцом и без него – Φ_M и Φ_{MO} . В этом случае намагниченность рассчитывается по формуле

$$M = (\Phi_M - \Phi_{MO}) / \mu_0 S N_K (1 - N), \quad (31)$$

где S — площадь контура, N_K — количество витков в катушке, N — размагничивающий фактор.

Изменение магнитного потока в измерительной катушке индуктивности (с образцом и без него) достигается и путем поворота ее на 180° вокруг оси, перпендикулярной к линиям напряженности магнитного поля. При этом наибольшей чувствительностью характеризуется способ измерения, основанный на использовании системы из двух катушек индуктивности, включенных антипараллельно. В одну из катушек вставляется ампула с исследуемым образцом. Намагниченность рассчитывается по формуле:

$$M = 2\Phi_M / \pi\mu_0 d^2 N_{K1} (1 - N), \quad (32)$$

где Φ_M — изменение магнитного потока, d — внутренний диаметр ампулы, N_{K1} — число витков в одной катушке. Относительная погрешность измерений ε_M составляет

$$\varepsilon_M = \sqrt{(\Delta\Phi_M / \Phi_M)^2 + (\Delta d / d)^2 + (\Delta N_{K1} / N_{K1})^2} \leq 5\%.$$

При расчетах постоянной измерительных катушек малых размеров может возникнуть необходимость учета поправки, связанной с цилиндрической формой обмоточного провода и с конечностью его толщины:

$$\Delta S/S = 2r^2/9R^2,$$

где r , R – радиусы сечений проводника и катушки.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. При помощи миллитесламетра произвести измерения магнитной индукции в различных точках постоянного магнита по лицевой и торцовой поверхностям:

1.1. Магнит кольцевой формы (3-4 образца различных размеров).

1.2. Магнитные пластинки.

1.3. В межполюсном пространстве и вдоль центральной вертикали U-образного постоянного магнита на вращающейся основе.

1.4. В межполюсном пространстве лабораторного электромагнита ФЛ-1 (измеряется остаточная намагниченность при отсутствии тока в катушках электромагнита).

2. Произвести перерасчет полученных результатов по величине магнитной индукции в значения напряженности магнитного поля.

3. При помощи кюветы с нанодисперсной магнитной жидкостью произвести визуальное изучение магнитного поля в окрестности перечисленных образцов и сопоставить полученное наглядное представление с результатами измерений.

4. Подготовить рабочее место (стенд) в лаборатории Г-614 для измерений на микровеберметре Ф-199 (разместить катетометр на столе, выставить столик для размещения постоянного магнита, подставку (держатель) для катушки индуктивности, предусмотреть возможность размещения лазерного определителя оси кольцевого магнита (нормали к поверхности плоского магнита или диска, таблетки)).

4.1. Рассчитать параметры катушки индуктивности для подключения к микровеберметру Ф-199. Исходные данные: измеряемое поле ≥ 1 кА/м; диаметр трубки-держателя ~ 10 мм, длина ~ 5 см. Зафиксировать намотку лаком (скотчем), припаять соединительные проводники и механически надежно соединить их с трубкой.

4.2. Решить обратную задачу: определив параметры катушки индуктивности и приблизительное значение напряженности поля, выбрать оптимальный диапазон измерений на микровеберметре Ф-199.

4.3. Методом «выдергивания» ИМП из заданной точки магнитного поля получить распределение индукции (напряженности) магнитного поля по

поверхности магнита (самостоятельно вывести расчетную формулу и рассчитать индукцию по полученным значениям изменяющегося магнитного потока и геометрии намотки).

4.4. Изучить топографию магнитного поля на поверхности магнитной пластинки, снабженной миллиметровой сеткой.

5. Произвести экспериментальную оценку критического значения напряженности нормальной составляющей магнитного поля, при котором возникают «пики» на поверхности магнитной жидкости, заполняющей кювету.

6. Произвести измерение намагниченности 2-х образцов магнитной жидкости путем выдерживания ампулы с исследуемым образцом из межполюсного пространства ФЛ-1 (при отсутствии тока в катушках электромагнита в межполюсном пространстве электромагнита сохраняется остаточная напряженность).

6.1. Продумать и изложить последовательность действий.

6.2. Рассчитать и изготовить применительно к данному случаю ИМП.

6.3. Самостоятельно вывести формулу для расчета намагниченности с учетом размагничивающего поля в образце.

6.4. Рассчитать напряженность магнитного поля.

6.5. Рассчитать намагниченность исследованных образцов МЖ.

7. Результаты занести в самостоятельно разработанную таблицу и дать к ним физический комментарий.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие величины характеризуют магнитное поле в вакууме и веществе? В каких единицах они измеряются?

2. Что представляет собой магнитная восприимчивость? Как она изменяется в процессе намагничивания вещества?

3. С чем связано возникновение размагничивающих полей? Каким образом вычисляется результирующее магнитное поле в образце?

4. Поясните принцип действия баллистического гальванометра.

5. В чем заключается баллистический метод измерения магнитного поля?

6. С какими физическими явлениями связано возникновение эффекта Холла? Как этот эффект применяется на практике?

7. Изложите последовательность действий при работе с магнитометром и микровеберметром.

8. Почему нанодисперсная магнитная жидкость может быть использована для визуального изучения магнитного поля?

9. Каким образом может быть измерена намагниченность магнитной жидкости?

ПРИМЕЧАНИЕ: для соблюдения условий безопасности и сохранности экспериментального оборудования включение и выключение источников питания, измерительных приборов и устройств производить только в присутствии ведущего преподавателя или учебного мастера!

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полунин В.М. Акустические свойства нанодисперсных магнитных жидкостей. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 384 с.
2. Чечерников В.И. Магнитные измерения. - М.: МГУ, 1969. 387с.

Определение магнитных моментов и размеров наночастиц магнитогранулометрическим методом

Цель работы: Произвести оценку магнитных моментов наночастиц дисперсной фазы магнитной жидкости и их размеров методом магнитогранулометрии.

Приборы и принадлежности: Электромагнит ФЛ-1 Москва главснаб ПО-716, Источник питания Matrix MPS-7061 (19500), Миллитесламетр портативный универсальный ТПУ, Микровеберметр Ф-199 Ленинград м/с Прибор По-110, ПЭВМ тип 1 (AsusP5G41T-M LE/DDR3 2048Mb/Coree 2 Duo E7500/SATA-11 500GbHitachi/DVD+/-RW/ATX 450W inwin/Монитор TFT Wide 20", измерительная ячейка, капсула с магнитной жидкостью.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

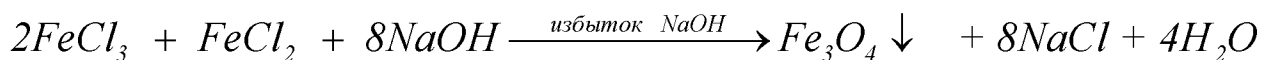
Суперпарамагнетизм [1-3] интересен не только как уникальное явление магнетизма, но и как специфический метод определения размеров, концентрации и распределения магнитных наночастиц. Данный метод получил название магнитогранулометрии (МГМ).

Под МГМ мы здесь понимаем простейшее представление этого метода гранулометрического анализа состава дисперсной системы, которое ограничивается получением «максимального» и «минимального» диаметров частиц d_{\max} и d_{\min} , (соответственно – величин магнитного момента $m_{*\max}$ и $m_{*\min}$) по данным линейной аппроксимации кривой намагничивания магнитной жидкости (МЖ) на начальном участке и в области магнитного насыщения.

МЖ представляют собой коллоидный раствор однодоменных ферри – и ферромагнитных частиц в жидкости-носителе. Для придания дисперсной системе необходимой агрегативной устойчивости магнитные частицы покрываются мономолекулярным слоем стабилизатора. По форме частицы близки к сферическим; их средний радиус и толщина стабилизирующей оболочки имеют порядок нескольких нм.

Технология получения МЖ основана на реакции химической конденсации. Химическая конденсация заключается в осаждении частиц магнетита из водного раствора солей двух- и трехвалентного железа избытком

концентрированного раствора щелочи:



Полученный осадок коллоидных частиц переводится в жидкостно-носитель при помощи метода пептизации, суть которого заключается в образовании на поверхности частиц слоя молекул ПАВ. В результате происходит разъединение частиц и последующее диспергирование в жидкостно-носителе.

В отсутствие магнитного поля однодоменные частицы можно считать намагниченными до насыщения. Их магнитный момент $m^* = VM_{so}$, где V – объем частицы. Намагниченность насыщения M_{so} зависит от размера частиц и падает при его уменьшении; при типичных для магнитных коллоидов размерах частиц M_{so} составляет ~50% от соответствующей величины многодоменного материала. Уменьшение M_{so} связывается с дефицитом соседей по обменному взаимодействию в поверхностном слое или химическими изменениями поверхностного слоя частиц [1-4].

Магнитные наночастицы, ответственные за процесс намагничивания в МЖ, находятся в состоянии суперпарамагнетизма, т.е. их магнитный момент совершает броуновское вращение. Наложение внешнего магнитного поля приводит к быстрому насыщению намагниченности МЖ в слабых и средних магнитных полях $M \sim 100$ кА/м, поскольку магнитный момент однодоменной частицы во много раз превосходит магнитные моменты отдельных атомов, что дополнительно подчеркивает уместность в отношении этих сред термина «суперпарамагнетик».

Энергия взаимодействия магнитного момента с внешним полем и телом частицы в случае анизотропии типа "легкая ось" определяется соотношением:

$$U = -\mu_0 m^* H - K_a V_f (m^* \cdot n)^2 / m^{*2},$$

где K_a – константа анизотропии; n – единичный вектор, задающий направление оси анизотропии.

Механизм вращения магнитного момента частицы зависит от соотношения слагаемых в этом выражении.

Если $\mu_0 m^* H \ll K_a V_f$, магнитный момент жестко связан с осью легкого намагничивания, т.е. "вморожен" в тело частицы. В этом случае механизмом, определяющим повороты магнитного момента, является вращение самой частицы. Установление ориентации магнитного момента вдоль оси легкого намагничивания происходит за время затухания ларморовской прецессии магнитного момента

$$\tau_{\gamma} = (\beta \omega_{\gamma})^{-1},$$

где $\omega_{\gamma} = \mu_0 \gamma_e H_a$ – частота ферромагнитного резонанса, по порядку величины равная 10^9 Гц; $\gamma_e = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг – гиромагнитное отношение для электрона; β – безразмерный параметр затухания, порядок величины которого 10^{-2} ; $H_a = 2K_a / \mu_0 M_s$ – напряженность поля анизотропии.

Тепловые вращательные флуктуации момента приводят к ослаблению его связи с телом частицы. Этот механизм характеризуется безразмерным параметром

$$\sigma^* = K_a V_f / k_0 T,$$

равным отношению энергии анизотропии к энергии тепловых флуктуаций. Константа анизотропии для ферромагнетиков изменяется в широком диапазоне $K_a \approx (10^6 - 10^2)$ Дж/м³. При комнатных температурах $k_0 T \approx 10^{-21}$ Дж и радиусе частицы $R \approx 4$ нм получим $\sigma^* \approx 10^2 \div 10^{-2}$.

Таким образом, σ^* может принимать значения как много больше, так и меньше единицы.

Если $\mu_0 m^* H \gg K_a V_f$, ориентация магнитного момента частицы близка к ориентации магнитного поля. Время релаксации зависит от частоты ферромагнитного резонанса, определяемой в данном случае значением напряженности внешнего поля.

Интенсивное тепловое движение столь малых частиц дисперсной фазы обуславливает высокую макроскопическую однородность всей системы. В итоге, решение проблемы создания несуществующего в природе материала с заданными физическими свойствами получено в смежной области знаний – физики ферромагнетизма, коллоидной химии и магнитной гидродинамики.

Наночастицы с массой m при комнатной температуре движутся с тепловыми скоростями $v = \sqrt{2k_0 T / m} \approx 1,7$ м/с, а характерное время, за которое частица изменяет направление движения, составляет $t \sim m / 3\pi\eta d_0 \sim 10^{-10}$ с. За это время частица перемещается на расстояние $\sim 0,1$ нм. Совершая быстрое хаотическое движение с «шагом» $\sim 0,1$ нм, частица медленно диффундирует, продвигаясь в среднем на расстояние $(2Dt)^{1/2}$ за время t , где $D = k_0 T / 3\pi\eta d_0$ – коэффициент диффузии. Установление равновесного распределения концентрации частиц происходит за конечное время τ^* . Порядок его определяется характерным временем диффузии:

$$\tau^* = 6\pi\eta R k_0 T / f^2,$$

где f – сила, действующая на частицу (в данном случае $f = mg$); η – вязкость

жидкости-носителя; R – радиус частицы.

Если принять $\eta=1$, $38 \cdot 10^{-3}$ Па·с (вязкость керосина), $R=5$ нм, $T=300$ К, $\rho=5240$ кг/м³ (плотность магнетита), то $\tau \approx 7 \cdot 10^7$ с ≈ 23 года.

В поле силы тяжести такая система остается однородной практически сколь угодно долго.

МЖ проявляют высокую устойчивость и в магнитных полях с сильной неоднородностью. В этом случае на ФЧ действует пондеромоторная сила

$$f = \mu_0 m^* G,$$

где G – градиент напряженности магнитного поля, m^* – магнитный момент частицы.

Принимая $m^* \approx 10^{-19}$ А·м², $G=10^6$ А/м², получим $\tau \approx 6 \cdot 10^6$ с ≈ 60 суток.

Благодаря сочетанию таких присущих только МЖ «взаимоисключающих» свойств, как текучесть, сжимаемость жидкой среды и способность намагничиваться до насыщения в сравнительно небольших магнитных полях $\sim 5 \cdot 10^5$ А/м и при этом приобретать значительную намагниченность $\sim 10^5$ А/м они нашли применение в различных областях науки и техники: магнитожидкостные уплотнения (герметизаторы), магнитоуправляемая смазка в узлах трения и опорах, сепараторы немагнитных материалов, очистители водной поверхности от нефтепродуктов, датчики угла наклона и ускорения, наполнители зазоров магнитных головок громкоговорителей.

Исследуемые образцы МЖ представляют собой коллоидный раствор магнетита Fe₃O₄ в углеводородной среде – керосине, стабилизированный олеиновой кислотой [4,5]. Изучаемые жидкости обладают высокой однородностью и стабильностью в течение длительного времени.

Введем физические параметры, представляющие магнитное поле и намагниченность вещества. Магнитное поле в вакууме характеризуется вектором H – напряженностью магнитного поля, $[H]=$ А/м. Магнитное поле в веществе описывается вектором магнитной индукции B , $[B]=$ Тл (Тесла). В случае слабомагнитных материалов, а также ферромагнетиков с малой коэрцитивной силой эти две величины связаны между собой линейной зависимостью

$$B = \mu_0 \mu H,$$

где $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ — магнитная проницаемость вещества. Для вакуума (приближенно и для воздуха) $\mu=1$.

Магнитный момент единицы объема вещества представляет собой

намагниченность M , $[M]=\text{А/м}$. С учетом этого параметра можно записать:

$$\mathbf{B} = \mu_0(1 + \chi)\mathbf{H} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}),$$

где χ – магнитная восприимчивость вещества; $M=\chi H$ – уравнение магнитного состояния.

Параметр χ изменяет свое численное значение в процессе намагничивания вещества. В слабых полях (в начале кривой намагничивания) χ представляет собой так называемую начальную восприимчивость χ_0 . Начальную магнитную восприимчивость χ_0 образцов МЖ можно найти по начальному наклону кривой намагничивания:

$$\chi_0 = M / H .$$

При увеличении H ферромагнетик намагничивается до насыщения, т.е. M принимает для данного материала максимальное значение M_S (намагниченность насыщения).

Для характеристики вещества в различных по величине магнитных полях вводят понятие дифференциальной магнитной восприимчивости: $\chi_d = \Delta M / \Delta H$. В полях, близких к насыщению $\chi_d \rightarrow 0$.

Степень намагничивания сильномагнитных веществ зависит не только от величины магнитной проницаемости, но и от их геометрической формы. При намагничивании внесенного во внешнее поле сильномагнитного тела, имеющего конечные размеры, на обеих его торцевых поверхностях возникают магнитные полюса («магнитные заряды» противоположного знака), что обуславливает появление поля в веществе противоположного направления (размагничивающее поле H').

Напряженность поля H' пропорциональна намагниченности M , поэтому можно написать

$$H' = N \cdot M,$$

где N — коэффициент пропорциональности, который называют размагничивающим фактором. Результирующее поле в веществе H_i получим как:

$$H_i = H_e - NM.$$

Строгий и точный расчет размагничивающего фактора возможен только для магнетиков в форме эллипсоидов.

При поперечном намагничивании длинного круглого стержня размагничивающий фактор будет равен:

$$N = \frac{l}{2}.$$

В случае намагничивания стержня вдоль оси при многократном превышении длины стержня (цилиндра с МЖ) над его диаметром $N=0$.

Полагая $M(H)=\chi H_i$, получим $H_i=H_e-NM=H_e-N\chi H_i$, откуда

$$H_i = \frac{H_e}{1 + N\chi} \quad \text{и} \quad M = \frac{\chi H_e}{1 + N\chi}.$$

Для столбика МЖ цилиндрической формы в поперечном к нему магнитном поле $N=0,5$, поэтому:

$$H_i = \frac{H_e}{1 + 0,5\chi} \quad \text{и} \quad M = \frac{\chi H_e}{1 + 0,5\chi}.$$

На начальном участке кривой намагничивания МЖ $\chi=\chi_0=\text{const}$. В нелинейной области кривой намагничивания следует учитывать, что $\chi = \frac{M}{H_i}$ – отношение полных (конечных) значений M и H_i . При $H_e \gg NM$ получим $H_i=H_e$, следовательно, в достаточно больших магнитных полях размагничивающими полями можно пренебречь.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Для измерения напряженности магнитного поля, градиента напряженности, намагниченности МЖ и ферросуспензий (ФС), а также для измерения остаточной намагниченности ФС используются различные варианты индукционного метода. Основой индукционного метода служит закон электромагнитной индукции, согласно которому ЭДС индукции, возникающая в проводящем контуре, численно равна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего данный контур.

Для измерения намагниченности исследуемая жидкость заливается в цилиндрическую ампулу. Продольное намагничивание образцов проводится либо внутри соленоида, предварительно проградуированного по току, либо – между полюсными наконечниками лабораторного электромагнита. Намагниченность или остаточная намагниченность определяются баллистическим методом по фиксации изменения магнитного потока,

пронизывающего витки измерительной катушки при выдергивании из нее намагниченного образца.

В наиболее простом случае измеряется магнитный поток, пронизывающий витки катушки при включении или выключении внешнего магнитного поля с исследуемым образцом и без него – Φ_M и Φ_{MO} . В этом случае намагниченность рассчитывается по формуле

$$M = (\Phi_M - \Phi_{MO}) / \mu_0 S N_K (1 - N)$$

где S - площадь контура, N_K - количество витков в катушке, N - размагничивающий фактор.

Изменение магнитного потока в измерительной катушке индуктивности (с образцом и без него) достигается и путем поворота ее на 180° вокруг оси, перпендикулярной к линиям напряженности магнитного поля.

Наибольшей чувствительностью характеризуется способ измерения, основанный на использовании системы из двух катушек индуктивности, включенных антипараллельно. В одну из катушек вставляется ампула с исследуемым образцом.

Блок-схема экспериментальной установки по измерению намагниченности магнитной жидкости данным методом представлена на рисунке 1. Ампула 1 с образцом магнитной жидкости помещается внутри одной из двух одинаковых катушек индуктивности 2 и 3, включенных в противоположном направлении и установленных на вращающемся штоке 4. Затем измерительная ячейка помещается между полюсами лабораторного электромагнита 5 и подключается к микровеберметру 6.

При повороте штока ячейки на 180° наблюдается изменение магнитного потока:

$$\Delta\Phi = \mu_0 (M - (-M))S = 2\mu_0 MS$$

где $S = \pi d^2 / 4$, d – внутренний диаметр ампулы.

Намагниченность рассчитывается по формуле:

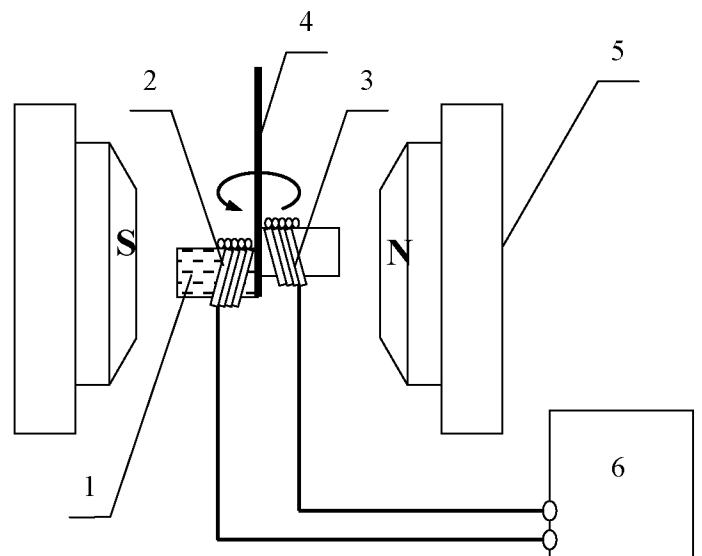


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения намагниченности

$$M = 2\Delta\Phi / \pi\mu_0 d^2 N_{KI} (1 - N),$$

где N_{KI} – число витков в одной катушке.

В случае соблюдения условия $d / l \ll 1$ – размагничивающий фактор $N \approx 0$, а относительная погрешность измерений ε_M :

$$\varepsilon_M = \sqrt{(\delta\Delta\Phi / \Delta\Phi)^2 + (\Delta d / d)^2 + (\Delta N_{KI} / N_{KI})^2}$$

не превышает 5%.

Значение намагниченности насыщения МЖ M_S можно определить по предельному значению намагниченности, для достижения которого требуются достаточно большие магнитные поля.

В соответствии с формулой

$$M = M_S - \frac{3M_S k_0 T}{4\pi\mu_0 M_{S0} H R^3},$$

где M_{S0} – намагниченность насыщения диспергированного ферромагнетика; R – радиус феррочастиц, надежность и точность измерения M_S будут выше, если по полученным данным построить график зависимости $M(I/H)$ и применить линейную аппроксимацию в области $I/H \approx 0$.

Методика измерений параметров вспомогательного назначения. Погрешность измерений

Помимо измерений упругих параметров колебательной системы проводились и вспомогательные измерения физических параметров, характеризующих исследуемые образцы МЖ: плотности, объемной концентрации твердой фазы.

Плотность МЖ определяется методом пикнометра. Взвешивание выполняется на аналитических демпферных весах. Однако, в связи с отсутствием у МЖ оптической прозрачности, появляется некоторая неопределённость в установлении уровня жидкости в горловине пикнометра. В результате чего погрешность измерения ρ достигает $\sim 0,2\%$.

Объемная концентрация φ вычисляется по известной из коллоидной химии формуле:

$$\varphi = \frac{\rho - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1},$$

где ρ - плотность образца МЖ; $\rho_1 = 780 \text{ кг/м}^3$ - плотность дисперсионной среды (керосин); $\rho_2 = 5210 \text{ кг/м}^3$ – плотность дисперсионной фазы (в нашем случае - магнетита Fe_3O_4).

Порядок включения и выключения установки

1. Лабораторный электромагнит подсоединить медными проводами к разъемам «+» и «-» источника тока.

2. Для выполнения измерений напряженности магнитного поля зонд измерителя магнитной индукции разместить между полюсами электромагнита в плоскости, параллельной полюсным наконечникам, и расположить его в центральной части межполюсного пространства.

3. Заполнить капсулу образцом магнитной жидкости, исключая попадания в нее воздушных пузырьков. Герметично закрыть ампулу и зафиксировать в измерительной ячейке.

4. Измерительную ячейку со штоком поместить между полюсами электромагнита и подключить к входным зажимам микровеберметра Ф199.

5. Подключить источник тока, измеритель магнитной индукции, микровеберметр к сети $\sim 220 \text{ V}$.

6. Для микровеберметра включить кнопки «НУЛЬ» и «СЕТЬ». При этом должен засветиться индикатор включения сети. Прогреть микровеберметр в течение 15 мин. Выбрать рабочий диапазон. Если порядок измеряемой величины заранее неизвестен, то установить измеряемый диапазон 25-0-25 мкВб.

7. Выбрать режим компенсации дрейфа показаний. При невысоком уровне электромагнитных помех в режиме автоматической компенсации микровеберметр, особенно в чувствительных диапазонах и в диапазоне 25-0-25 мВб, работает неустойчиво. Это проявляется в возрастании дрейфа показаний выше норм. В этом случае следует производить измерения в режиме ручной компенсации, а переменные резисторы ГРУБО, ТОЧНО установить в такое положение, при котором в отсутствии измеряемого сигнала сползание указателя отсутствует.

8. Установить ручки источника тока в крайнее левое положение. При этом ток в катушках электромагнита отсутствует, а прибор показывает нулевое значение.

9. Нажать кнопку Ф на микровеберметре, осуществить поворот штока измерительной ячейки на 180° , произвести измерение магнитного потока.

Величины магнитной индукции и магнитного потока сохранить в программе MS Excel.

10. Включить кнопку НУЛЬ и подготовить схему для последующих измерений. Увеличить величину магнитного поля источником тока и дальнейшие измерения произвести аналогично пункту 9.

11. После завершения эксперимента источник тока установить в нулевое положение, после этого отключить питание у измерительных приборов.

Получение кривой намагничивания

Приведем пример кривой намагничивания. Для нахождения магнитных параметров χ и M_s баллистическим методом снимается кривая намагничивания $M(H)$. При этом МЖ заполняет ампулу цилиндрической формы, длина которой значительно превосходит

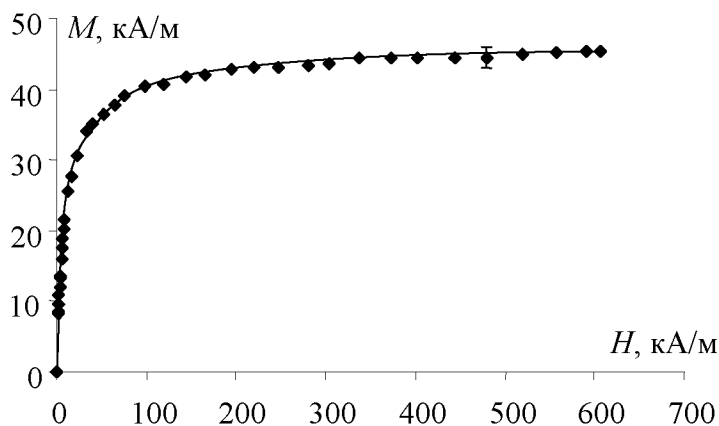


Рис. 2. Кривая намагничивания МЖ-1

диаметр, что позволяет пренебречь размагничивающим полем [4]. Полученная кривая намагничивания МЖ приведена на рисунке 2.

Начальная магнитная восприимчивость χ определяется по наклону начального (прямолинейного) участка кривой $M(H)$. Параметр M_s находится путем линейной аппроксимации зависимости $M(H^1)$ в окрестности $H^1 \approx 0$ и экстраполяции полученной прямой до пересечения с осью ординат (рисунок 3).

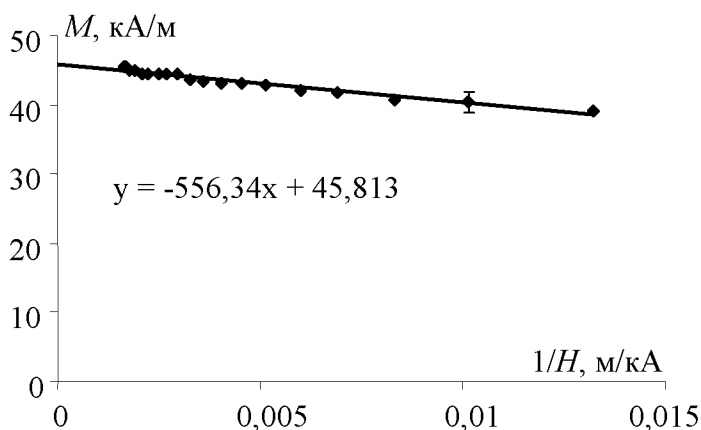


Рис. 3. Аппроксимация зависимости $M(H^{-1})$

Расчет «максимального» и «минимального» магнитных моментов наночастиц и их диаметра

Максимальные и минимальные магнитные моменты частиц m_{*max} , m_{*min} , полученные на основе магнитогранулометрического метода, в соответствии с теорией суперпарамагнетизма рассчитываются по формулам [4,5]:

$$m_{*max} = \frac{3k_0T\chi}{\mu_0M_S}, \quad (1)$$

$$m_{*min} = \frac{k_0T}{\mu_0M_S} \cdot (M/H^{-1})^{-1}, \quad (2)$$

где M/H^{-1} - тангенс угла наклона прямолинейного участка кривой $M(H^{-1})$ при $H \rightarrow \infty$.

Размер частиц (диаметр – в предположении их сферической формы) определяется из выражения:

$$d = \sqrt[3]{6m_* / \pi M_{S0}} = 0,016 \sqrt[3]{m_*}, \quad (3)$$

где M_{S0} - намагниченность насыщения дисперсной фазы ($M_{S0} = 477,7$ кА/м для магнетита).

Пример расчета магнитных моментов наночастиц

В таблице 1 представлены физические параметры исследуемого образца (плотность – ρ , концентрация твердой фазы – ϕ , начальная магнитная

восприимчивость – χ , намагниченность насыщения – M_s , скорость звука в системе МЖ – стеклянная трубка – с), полученные при температуре 31°C.

Таблица 1. Физические параметры исследуемого образца.

Образец	ρ , кг/м ³	φ , %	χ	M_s , кА/м	$m_{*max} \cdot 10^{19}$, А·м ²	$m_{*min} \cdot 10^{19}$, А·м ²	d_{max} , нм	d_{min} , нм
МЖ-1	1315	12	3,4	45,8	МГА			
					7,52	2,74	14,6	10,4

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Произвести измерение плотности МЖ ρ
2. Рассчитать объемную концентрацию твердой фазы φ
3. Получить кривую намагничивания предложенного образца МЖ
4. Определить величину M_s путем линейной аппроксимации зависимости $M(H^1)$ в окрестности $H^1 \approx 0$
5. Определить параметр χ по тангенсу угла наклона начального участка кривой намагничивания
6. Рассчитать значение m_{*max}
7. Рассчитать значение m_{*min}
8. Рассчитать значение d_{max}
9. Рассчитать значение d_{min} ,

ПРИМЕЧАНИЕ: для соблюдения условий безопасности и сохранности экспериментального оборудования включение и выключение источников питания, измерительных приборов и устройств производить только в присутствии ведущего преподавателя или учебного мастера!

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите физические параметры, характеризующие магнитное поле и намагниченность вещества.
2. Что представляет собой нанодисперсная магнитная жидкость?
3. Что представляет собой магнитная наночастица?
4. В чем заключается природа размагничивающих полей? Что такое размагничивающий фактор?

5. Поясните используемый в работе метод получения кривой намагничивания.
6. Объясните используемый в работе метод измерения плотности МЖ и расчета ее объемной концентрации.
7. Прокомментируйте полученные результаты, характеризующие параметры магнитных наночастиц дисперсной фазы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суздаев И.П. Нанотехнология: Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. 2013. Твердый переплет. 592 с. ISBN 978-5-397-03389-3
2. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии // Изд. 2. М:Физматлит, 2009 год, 416 стр ISBN: 978-5-9221-0582-8
3. Баштовой В.Г., Берковский Б.М., Вислович А.Н. Введение в термомеханику магнитных жидкостей. – М.: ИВТАН, 1985, 188 с.
4. Полунин В.М. Акустические свойства нанодисперсных магнитных жидкостей. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 384 с.
5. Полунин В.М. Акустические эффекты в магнитных жидкостях. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 208 с.
6. Полунин В.М., Стороженко А.М., Танцюра А.О. и др. Акустометрия нанодисперсной фазы магнитной жидкости// Нанотехника. 2011. №2 (26). С.64-69.

Азимутальная зависимость акустомагнитного эффекта в нанодисперсной магнитной жидкости

Цель работы: Экспериментально полученную азимутальную зависимость акустомагнитного эффекта сравнить с теоретической кривой.

Приборы и принадлежности: уст-ка усилитель УШ 10Э ПО-1, миллитесламетр портативный универсальный ТПУ, микроверметр Ф-199 Ленинград м/с Прибор По-110, генератор ГЗ-33 Лаб.электричества ПО-147, осциллограф С1-117 з-д Маяк ПО-55, устройство сбора данных 780115-04 NI USB-6251 (73481.55), ПЭВМ тип 1 (AsusP5G41T-M LE/DDR3 2048Mb/Coree 2 Duo E7500/SATA-11 500GbHitachi/DVD+/-RW/ATX 450W inwin/Монитор TFT Wide 20", постоянный лабораторный магнит, стеклянная капсула с магнитной жидкостью.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Сущность акустомагнитного эффекта в нанодисперсной магнитной жидкости

Синтезированные в середине 60-ых годов XX века жидкие ферромагнетики – нанодисперсные магнитные жидкости, представляют собой коллоидные растворы различных ферро- или ферримагнитных веществ в обычных жидкостях.

В магнитном и ультразвуковом полях нанодисперсная магнитная жидкость (МЖ) приобретает новое свойство – излучение электромагнитной волны. Впервые этот эффект, названный *акустомагнитным*, был описан в работах В.М. Полунина [1, 2]. В процессе распространения в намагниченной МЖ акустической волны, за счет колебаний концентраций феррочастиц и температуры, а также кинетики агрегатов, в жидкости-носителе происходят возмущения намагниченности и размагничивающего поля. В результате их конкуренции наблюдается акустомагнитный эффект (АМЭ) – возникновение ЭДС индукции в катушке индуктивности, прижатой к стеклянной трубке, наполненной магнитной жидкостью. Этот эффект позволяет регистрировать акустические колебания и исследовать индукционным методом акустическое поле в МЖ. Амплитуда ЭДС зависит от угла φ , образованного вектором напряженности магнитного поля \vec{H} и нормалью \vec{n} к рамке. *Азимутальной*

зависимостью АМЭ называют кривую зависимости ЭДС при вращении магнитного поля относительно округлой формы катушки индуктивности, прижатой к трубке с МЖ.

В данной лабораторной работе исследуется азимутальная зависимость амплитуды переменной ЭДС в АМЭ в процессе вращения магнитного поля на угол $\varphi = \pi$, а также при многократном вращении магнитного поля.

Теоретическая и экспериментальная оценки амплитуды АМЭ в поперечном магнитном поле

Получим выражение для оценки амплитуды АМЭ в поперечном к направлению распространения плоской звуковой волны в МЖ магнитном поле, содержащее зависимость от угла φ , образованного направлениями магнитного поля \vec{H} и нормали \vec{n} к поверхности проводящего контура. На рис. 1 показана схема задачи.

За основу возьмем модель, в которой рамка округлой формы вплотную прилегает к поверхности трубки. При статической деформации (трубка абсолютно жесткая) жидкостного столбика:

$$\delta B = \mu_0(\delta M - N\delta M) = \mu_0(1 - N)\delta M,$$

где \vec{B} - вектор магнитной индукции, μ_0 - магнитная постоянная, M - намагниченность, $N = 0,5$ - размагничивающий фактор. В силу постоянства нормальной составляющей индукции на границе магнетиков имеем:

$$\delta B_n^{(i)} = \delta B_n^{(e)},$$

где $\delta B_n^{(e)}$ - нормальная составляющая приращения индукции на поверхности рамки.

$$\delta B_n^{(e)} = \delta B \cdot \cos \theta = \mu_0(1 - N) \cdot \delta M \cdot \cos \theta,$$

где θ - угол между направлениями магнитного поля и луча, ограничивающего рамку.

Приращение магнитного потока через полоску шириной dL :

$$\delta \Phi = N_B \cdot h \cdot dL \cdot \delta B_n^{(e)} = N_B \cdot h \cdot dL \cdot \mu_0 \cdot (1 - N) \cdot \delta M \cdot \cos \theta,$$

где L - длина рамки, h - ее высота ($h \ll \lambda$), N_B - число витков.

С другой стороны,

$$d\theta = \frac{2dL}{D},$$

где D - диаметр трубки.

Тогда

$$\delta\Phi = \mu_0(1-N)N_B \frac{D}{2} h \cdot \delta M \cdot \cos\theta \cdot d\theta.$$

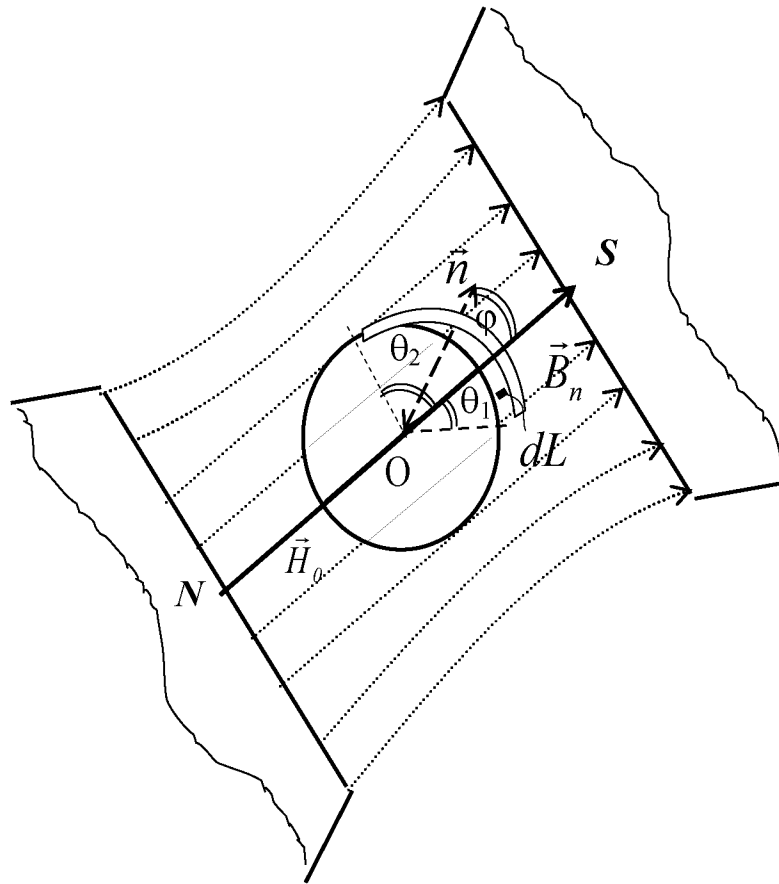


Рисунок -1. Схема задачи.

Магнитный поток, пронизывающий контур рамки:

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 = \mu_0(1-N)N_B \frac{D}{2} h \cdot \delta M \left[\int_0^{\theta_1} \cos\theta \cdot d\theta + \int_0^{\theta_2} \cos\theta \cdot d\theta \right].$$

В данном случае $\varphi = \frac{\theta_2 - \theta_1}{2}$, поэтому

$$\Delta\Phi = \mu_0(1-N)N_B \cdot \frac{D}{2} h \cdot \delta M \left[\int_0^{\frac{L}{D}-\varphi} \cos\theta \cdot d\theta + \int_0^{\frac{L}{D}+\varphi} \cos\theta \cdot d\theta \right],$$

$$\Delta\Phi = \mu_0(1-N)N_B \cdot D \cdot h \cdot \delta M \cdot \sin\frac{L}{D} \cdot \cos\varphi.$$

Амплитуда ЭДС, индуцируемая в контуре:

$$\varepsilon = -\frac{d(\Delta\Phi)}{dt} = -\mu_0(1-N)N_B \cdot D \cdot h \cdot \delta\dot{M} \cdot \sin\frac{L}{D} \cdot \cos\varphi.$$

При $L < D$ получим:

$$\varepsilon = -\mu_0(1-N)N_B L \cdot h \cdot \delta\dot{M} \cdot \cos\varphi. \quad (1)$$

Если $\lambda < D$, то необходимо заменить N на N_∂ - динамический размагничивающий фактор [2].

Для округлой катушки №1 получена полярная диаграмма экспериментальной зависимости амплитуды индуцируемой ЭДС от угла φ в относительных единицах, представленная на рис. 2.

Точки представляют экспериментальные значения, полученные в процессе вращения магнитного поля с шагом 5° . Тонкой линией показан график функции $\cos\varphi$. Таким образом, за один оборот магнита амплитуда, следуя изменению $|\cos\varphi|$, дважды принимает максимальное значение и дважды равна нулю, что соответствует полученному выражению (1).

Методика измерений и описание экспериментальной установки

Методика экспериментального исследования АМЭ базируется на использовании плоской звуковой волны. С точки зрения простоты получения плоской звуковой волны в диапазоне низких ультразвуковых частот 10 – 70 кГц и последующего намагничивания жидкости наиболее приемлемой оказывается методика, сущность которой заключается в следующем. Цилиндрическая труба из немагнитного и неэлектропроводного материала заполняется МЖ, затем помещается частично или полностью в поперечное или продольное магнитное поле, после чего в жидкость вводится звуковая волна. Индуцируемое в жидкости неоднородное в пространстве и переменное во

времени магнитное поле воспринимается измерительной катушкой индуктивности, сигнал с которой прямо поступает на осциллограф.

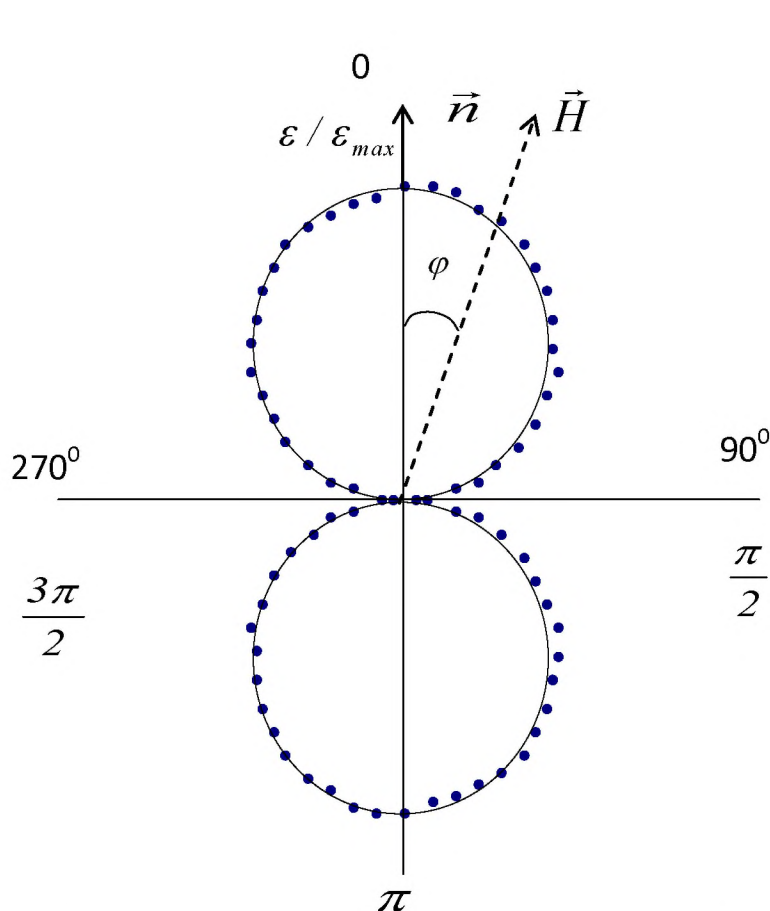


Рис. 2.. Азимутальная зависимость относительной амплитуды АМЭ в магнитной жидкости от угла φ . Тонкая сплошная линия – теория, точки – экспериментальные значения.

В цилиндрической трубе определенного радиуса в зависимости от возбуждения могут существовать различные моды нормальных волн. Если частота колебаний меньше наименьшей критической, то в трубе могут существовать только плоские волны, которые распространяются с фазовой скоростью, не зависящей от частоты. Труба по отношению к этим волнам считается узкой.

Критерий распространения в круглой трубе плоской волны заключается в выполнении неравенства:

$$R_T < 0,61\lambda .$$

где R_T – радиус трубки (цилиндра), λ – длина звуковой волны. Если, например, $R_T = 0,5 \cdot 10^{-2}$ м, $c = 10^3$ м/с, то критическая частота составляет 122 кГц, следовательно, можно рассчитывать на получение плоской волны на частотах, ниже 122 кГц.



Рис.3. Фотография установки для получения азимутальной зависимости АМЭ в МЖ.

Установленная вертикально стеклянная трубка с плоским доньшком заполнена МЖ. Источником звуковых колебаний (излучателем) является пьезоэлектрическая пластина, на которую с генератора ГЗ–33 подается переменное электрическое напряжение заданной частоты ν . Частота контролируется частотомером ЧЗ – 33, а напряжение – вольтметром В7 – 28. Упругие волны через тонкое доньшко акустической головки распространяются в МЖ. Измерительная катушка полукруглой формы, размещена в непосредственной близости от внешней поверхности трубки, жестко связана с кинематическим узлом катетометра В–630. Переменная ЭДС с катушки поступает на вход широкополосного усилителя УШ 1-10, с выходного разъема которого подается на вход осциллографа С1–117 и АЦП с коннекторным блоком (NI 6251+ BNC-2120), подключенным к компьютеру. Источником магнитного поля служит постоянный магнит, установленный на вращающейся платформе. Поддержание температуры осуществляется при помощи воздушного термостата.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Провести измерения амплитуды ЭДС, индуцируемой за счет АМЭ, в зависимости от угла φ с шагом 10^0 .
2. Представить полученные значения ЭДС в относительных единицах $\varepsilon / \varepsilon_{\max}$.
3. Результаты теоретического расчета и экспериментальные данные занести в таблицу:

φ , град	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
ε , мВ										
$\varepsilon / \varepsilon_{\max}$										

4. На одном и том же графике представить теоретическую кривую $\varepsilon / \varepsilon_{\max} = f(\varphi)$ и экспериментальные данные (в виде **жирных точек**).

ПРИМЕЧАНИЕ: для соблюдения условий безопасности и сохранности экспериментального оборудования включение и выключение источников питания, измерительных приборов и устройств производить только в присутствии ведущего преподавателя или учебного мастера!

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Физические параметры, характеризующие магнитное поле и намагниченность вещества.
2. В чем заключается критерий распространения в круглой трубе плоской волны?
3. Что представляет собой нанодисперсная магнитная жидкость?
4. Какова физическая сущность акустомагнитного эффекта?
5. Прокомментируйте полученные результаты, характеризующие особенности акустомагнитного эффекта в нанодисперсной магнитной жидкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полунин В.М. Магнитные жидкости // Большая Российская энциклопедия: Т.18. Ломоносов- Манизер.- М.: Большая Российская энциклопедия, 2011. – с. 373-374.
2. Полунин В.М. Акустические свойства нанодисперсных магнитных жидкостей. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 384 с.