

УДК 537.621.4

**МАГНЕТОМЕТР ФАРАДЕЯ С ПОЛЮСНЫМИ
НАКОНЕЧНИКАМИ-ПОЛУСФЕРАМИ: ИДЕНТИФИКАЦИЯ
ЗОНЫ СТАБИЛЬНОГО СИЛОВОГО ФАКТОРА**

**А.В. Сандуляк,
А.А. Сандуляк,
М.Н. Полисмакова,
Д.О. Киселев,
Д.А. Сандуляк[@]**

*Московский технологический университет, Москва 107996, Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: d.sandulyak@mail.ru*

Оценены принципиальные положения и направления в создании устройств для изучения магнитной восприимчивости образцов методом Фарадея. Обращено внимание на существующую проблему идентификации рабочей зоны, ответственной за координацию в ней малообъемных образцов. Сформулированы предпосылки к безусловному проявлению зоны стабильности градиента напряженности (индукции) поля как необходимого, но недостаточного условия наличия зоны стабильности магнитного силового фактора – произведения напряженности или индукции поля на ее градиент. Показано, что наметившаяся тенденция в создании магнетометров Фарадея связана с применением сильного постоянного магнита, обращенного полюсной поверхностью к изучаемому образцу. Однако, по нашему мнению, нецелесообразно рассматривать это направление как перспективное из-за отсутствия предпосылок для проявления зоны стабильности, как градиента, так и силового фактора. Вряд ли приемлемо создание магнетометров Фарадея с применением таких взаимно наклонных катушек, которые формируют поле стабильного градиента, также вследствие отсутствия возможности для проявления зоны стабильности силового фактора. На примере сферических полюсных наконечников, рекомендуемых к использованию в магнетометрах Фарадея, доказано безусловное наличие зон, где индивидуальные значения градиента и магнитного силового фактора являются стабильными, т.е. в окрестности экстремумов этих параметров, установлены и сопоставлены их координаты. Показано, что абсциссы экстремумов остаются практически неизменными для каждого из расстояний между полюсными наконечниками, независимо от токовой нагрузки, причем экстремумы силового фактора располагаются на 30-40% ближе к осевой линии полюсов, чем экстремумы градиента. Обнаружено влияние расстояния между полюсными наконечниками на значения абсцисс экстремумов градиента и силового фактора (логарифмическая связь), а также на значения их ординат (степенная связь).

Ключевые слова: магнетометр Фарадея, индукция, градиент, магнитный силовой фактор, зона в окрестности экстремума.

FARADAY MAGNETOMETER WITH SPHERIC POLE PIECES: IDENTIFICATION ZONE WITH A STABLE FORCE FACTOR

A.V. Sandulyak,
A.A. Sandulyak,
M.N. Polismakova,
D.O. Kiselev,
D.A. Sandulyak[@]

Moscow Technological University, Moscow 107996, Russia
[@]Corresponding author e-mail: d.sandulyak@mail.ru

Basic principles and approaches in generation of devices for realization Faraday method are evaluated (for learning magnetic susceptibility of samples). It is noticed that problem exists – it is difficult to identify an operating area to coordinate here samples with a small volume. It was defined a prerequisites for an appearance area with a stable value of magnetic field intensity (induction) gradient of magnetic field. Presence such zone is a necessary but not sufficient condition for presence a zone with a stable value of magnetic forceful factor (as a product of field intensity or pole induction by its gradient). It was shown that developing direction in creating a Faraday magnetometer with a strong permanent magnet which pole surface is faced to sample is impractical because there is no prerequisites for an appearance stable zone both gradient and magnetic forceful factor. A creating Faraday magnetometer with mutually canted coils is hardly practical too. These coils generate magnetic field with a stable gradient but not with a stable magnetic forceful factor.

By the example of spheric pole pieces (recommended for using at Faraday magnetometer) presence an areas with stable gradient and magnetic forceful factor is proved (at the range of their extremum values). Range of such areas is defined and compared to each other. It was shown that absciss values of extremum are almost stable (for each distance between pole pieces, regardless of current load), magnetic forceful factor's extremum are close to axis of magnet pole for about 30-40% than gradient's extremum. There were defined the influence of distance between pole pieces on absciss values of extremums of gradient and magnetic forceful factor (a logarithmic dependence) and on their ordinate values (power dependence).

Keywords: Faraday magnetometer, induction, gradient, magnetic forceful factor, range of extremum values.

Введение

К числу востребованных методов контроля магнитных свойств, в частности, магнитной восприимчивости различных образцов относится пондеромоторный, силовой метод Фарадея. Его применение посредством так называемых весов Фарадея (*Faraday balance, Faraday magnetometer*) делает технически доступным решение задачи получения необходимой информации в широком диапазоне температур [1–10]. Указанное обстоятельство отличает этот метод от других известных методов. Следует особо отметить, что для полноценной реализации метода достаточно использовать всего лишь малые, зачастую оправданно малые, образцы [1, 11, 12] и не только сплошные, но и дисперсные, напри-

мер, порошковые [2, 6, 7, 11, 12]. Так, с объективно малообъемными пробами дисперсной примесной фазы приходится иметь дело в процессах магнитофореза и магнитоконтроля ферропримесей природных и техногенных сред [13–19].

Возможности сравнительно несложного и достаточно точного решения широкого круга задач, преимущества, а в ряде случаев – предпочтительность магнетометра Фарадея в сравнении с альтернативными, например, широко применяемыми SQUID и вибрационными магнетометрами, включая возможности полезного взаимодополнения данных, описаны в [8–10, 12, 20–22]. Зачастую он позиционируется как более чувствительный, чем вибрационный магнетометр, а в [8, 21, 22] констатируется хорошая корреляция данных, полученных с использованием магнетометра Фарадея и SQUID-магнетометра.

1. О принципиальных положениях, направлениях в создании магнетометров для реализации метода Фарадея и необходимости его совершенствования

В основу метода Фарадея (магнетометра Фарадея) положено фундаментальное выражение для магнитной, т.е. пондеромоторной, силы, действующей на магнетик – образец малого объема V магнитной восприимчивостью χ в неоднородном (градиентном) магнитном поле напряженностью H (или индукцией B , причем для воздушной среды $B = \mu_0 H$) [20–25]:

$$F = \mu_0 \cdot \chi \cdot V \cdot H \text{grad}H = \chi \cdot V \cdot B \text{grad}B / \mu_0, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная константа.

Градиент поля $\text{grad}H$ (или $\text{grad}B$) может быть определен на основании координатных зависимостей H (или B), получаемых, например, пошаговыми измерениями B датчиком Холла [21, 22, 25]. Для этого получаемые и аппроксимируемые координатные зависимости H (или B) следует продифференцировать [25]. Тогда величина χ при уже известных (измеренных, вычисленных) значениях остальных величин, входящих в (1), определяется расчетом как:

$$\chi = F / (\mu_0 \cdot V \cdot H \text{grad}H) = F \cdot \mu_0 / (V \cdot B \text{grad}B). \quad (2)$$

Что касается вариантов исполнения рабочих органов магнетометра Фарадея, прежде всего тех, которые ответственны за создание градиентного магнитного поля, то они, будучи самыми различными конструктивно, могут иметь, в основном, три принципиальных отличия в выборе способа генерации поля.

Самый распространенный подход – это использование электромагнитной системы, т.е. функционального блока, состоящего из таких характерных элементов, как обмотки намагничивания, сердечники и полюсные наконечники той или иной формы [3, 11, 22, 23, 26].

Еще один принципиальный подход – использование коротких катушек (соленоидов) без сердечников и полюсных наконечников [6, 9, 10, 12, 20, 24, 27]. Здесь сами катушки способны создавать необходимое для проявления достаточной магнитной силы неоднородное и высокое по напряженности магнитное поле, особенно при использовании высокоамперных, получаемых путем криогенного охлаждения, катушек.

Новый подход, обсуждаемый ниже, заключается в использовании сильных постоянных магнитов [21, 28], в частности, магнита, обращенного полюсной поверхностью к изучаемому образцу [21]. Постоянные магниты также способны создавать неоднородное магнитное поле, о чем свидетельствует соответствующая диагностика индукции поля, например, по мере удаления от поверхности магнита.

При использовании любого из магнетометров Фарадея важной задачей является установление местоположения рабочей (локальной) зоны в области созданного градиентного поля – зоны для размещения в ней малообъемного исследуемого образца. В [25] на примере электромагнитной системы с полюсными наконечниками-полусферами диаметром 100 мм показан результативный подход к решению этой задачи и выполнен первый, определяющий, этап исследований, ограничивающийся обоснованием способа выявления местоположения и размеров зоны стабильных значений $gradB$. Необходимым стартовым действием для этого является обязательное получение характеристики индукции B или напряженности H поля [25]. Тогда, располагая именно такой координатной характеристикой, в случае, если эта характеристика извилистая, с четко видимым перегибом, можно судить о наличии и местоположении зоны стабильных значений градиента. Следовательно, сравнительно короткий участок этой характеристики в зоне перегиба, поддающийся линейной аппроксимации, свидетельствует о стабильном, примерно постоянном, значении на этом участке параметра $gradB = dB/dx$. Это демонстрируется наличием экстремума на получаемой путем дифференцирования координатной характеристики параметра $gradB$ – с абсциссой экстремума $x = x_{extr} = (x_{extr})_{gradB}$ в окрестности которого значения $gradB$ практически стабильны.

Тогда вполне можно ожидать, что и координатная характеристика столь же важного параметра $BgradB$ будет иметь экстремум с абсциссой $x = x_{extr} = (x_{extr})_{BgradB}$. При этом искомая зона, где значения $BgradB$ практически стабильны, находится в окрестности экстремума этой характеристики.

Изложенный подход к идентификации рабочей зоны позволяет сделать следующее концептуальное замечание. Если координатная, обычно нелинейная, характеристика, например, B в области создания градиентного магнитного поля того или иного магнетометра не содержит перегиба, то участок, который можно было бы подвергнуть желаемой линеаризации, отсутствует. Следовательно, на соответствующей координатной характеристике $gradB$ будет отсутствовать экстремум, в окрестности которого значения $gradB$ практически стабильны. Тогда однозначным здесь является вывод о неприемлемости такого варианта магнетометра.

Сделанный вывод в полной мере касается системы, выполненной с использованием постоянного магнита (в частности, Nd–Fe–B) [21], обращенного полюсной поверхностью в магнетометре Фарадея к изучаемому образцу.

Некоторые варианты позиционирования источников градиентного поля в магнетометрах Фарадея приведены на рис. 1. Здесь схема (а) – неприемлемая для получения характеристик со стабильными значениями параметра $gradB$ (или $gradH$) и параметра $B \cdot gradB$ (или $H \cdot gradH$); схема (б) – альтернативная приемлемая для получения этих характеристик; схема (в) при рекомендуемом в [27] угле взаимного наклона катушек $\Theta = 290$ (радиус катушек 7.5 см) – приемлемая для получения характеристики со стабильными значениями параметра $gradB$ (или $gradH$) и неприемлемая для получения характеристики со стабильными значениями параметра $B \cdot gradB$ (или $H \cdot gradH$).

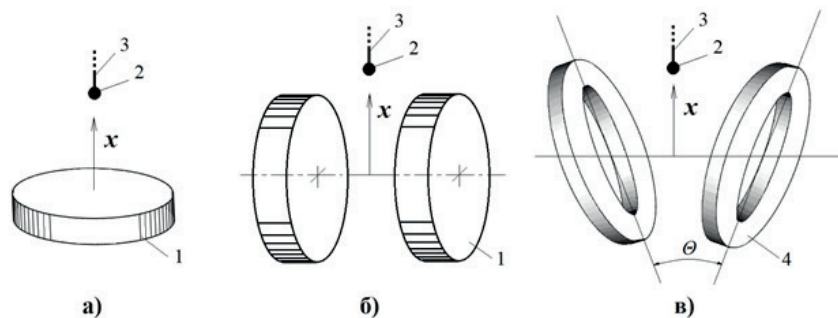


Рис. 1. Некоторые варианты позиционирования источников градиентного поля в магнетометрах Фарадея: а) постоянного магнита [21]; б) двух магнитов; в) взаимно наклонных коротких катушек [27]: 1 – магнит, 2 – изучаемый образец, 3 – подвес образца, соединенный с измерителем силы, 4 – катушка.

Данные диагностики показывают (рис. 2), что как в случае [21] (рис. 2а), так и в других подобных случаях (рис. 2б), каждая из координатных характеристик индукции B создаваемого градиентного поля по мере удаления от полюсной поверхности магнита убывает монотонно, асимптотически. Она вся или хотя бы ее участок не являются линейными, она также не имеет перегиба, что позволило бы выделить участок, поддающийся линейной аппроксимации. Итак, если дополнительно получить (дифференцированием такой координатной характеристики B) координатную характеристику параметра $gradB$, то необходимые признаки – «плато» или экстремум, которые должны были бы свидетельствовать о наличии столь необходимой здесь зоны стабильных значений градиента, будут попросту отсутствовать. Естественно, в этом случае аналогичные признаки будут отсутствовать и на координатной характеристике параметра $BgradB$.

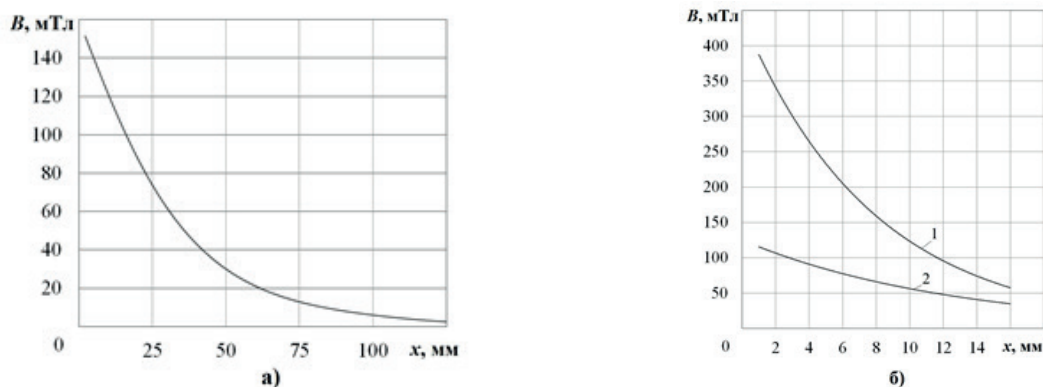


Рис. 2. Изменение индукции градиентного магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом, по мере удаления от полюсной поверхности магнита: а) по данным [21] для магнита Nd–Fe–B; б) полученные данные для магнита Nd–Fe–B (1) и магнита типа ЮНДК (2).

Это и есть основной мотив возражений против использования в магнетометрах Фарадея постоянных магнитов по предложенной в [21] схеме их позиционирования (рис. 1а) и, следовательно, против создания таких магнетометров. Тем не менее, такой мотив не должен распространяться на другие возможные магнетометры Фарадея с постоянными магнитами. Оправданным, гарантирующим получение извилистой координатной зависимости индукции (напряженности), было бы решение использовать систему из двух по-

стоянных магнитов (двух блоков магнитов), расположенных в виде противостоящих блоков параллельно друг другу (рис. 1б) или под углом друг к другу [28]. При определенном угле взаимного наклона катушек $\Theta=290$ (радиус катушек 7.5 см), как показано на рис. 1в, между ними гарантируется создание поля одинакового градиента [27], что одновременно исключает возможность создания зоны одинакового магнитного силового фактора. В случае получения, например, протяженной координатной характеристики параметра B (или H) в виде линейно убывающей зависимости [27] типа $B = \text{Const}_1 - \text{Const}_2 \cdot x$ действительно можно говорить о наличии здесь зоны стабильных значений градиента, о чем свидетельствует дифференцирование этой зависимости, а именно $dB/dx = -\text{Const}_2$. Однако это совсем не означает присутствия зоны стабильных (постоянных или близких к ним) значений еще одного ключевого параметра, а именно BdB/dx , поскольку тогда он выступает как величина, зависящая от x : $BdB/dx = -(\text{Const}_1 - \text{Const}_2 \cdot x) \cdot \text{Const}_2 \neq \text{Const}$.

Таким образом, надо стремиться уйти от рекомендации располагать катушки под углом $\Theta=290$. Важно обеспечить такой взаимный наклон катушек, при котором координатная зависимость индукции (напряженности) стала бы извилистой, гарантируя тем самым наличие зоны стабильного градиента и магнитного силового фактора. То же в равной мере относится и к уже упоминавшемуся случаю с противостоящими взаимно наклонными постоянными магнитами [28].

2. Координатная характеристика магнитного силового фактора. Идентификация зоны его стабильности

В [25] с использованием электромагнитной системы, в которой градиентное магнитное поле создавалось при помощи полюсных наконечников-полусфер диаметром 100 мм, экспериментально получены и феноменологически аппроксимированы полиномом четвертой степени координатные характеристики индукции B . Эксперименты выполняли при различных значениях тока питания обмоток I : от 4 А до 30 А и взаимного удаления наконечников b : от 3.5 мм до 15.3 мм. Это позволило найти соответствующие координатные, экстремальные по виду, характеристики параметра $gradB = dB/dx$ (рис. 3), координаты экстремумов которых при увеличении b смещаются в сторону больших значений согласно логарифмическому выражению: $x_{extr} = x_* \ln(b/b_*)$ – при значениях феноменологических параметров $x_* = 5.7$ мм и $b_* = 0.82$ мм (независимо от токовой нагрузки).

Данные, приведенные на рис. 3, позволяют также найти закономерность убывания экстремальных значений градиента ($|gradB|_{extr}$) при увеличении b (рис. 4); квазилинеаризуясь в логарифмических координатах, эта закономерность оказалась убывающей степенной с показателем степени 1.33, причем независимо от токовой нагрузки: $|gradB|_{extr} \sim b^{-1.33}$.

Если вести речь о рабочей зоне магнетометра Фарадея как зоне оговоренного в [3, 23] стабильного значения произведения индукции или напряженности на соответствующий градиент, т.е. как $B \cdot gradB \cong \text{Const}$ или $H \cdot gradH \cong \text{Const}$, именуя такое произведение магнитным силовым фактором, то можно убедиться в следующем. Наличие экстремума на характеристике градиента $gradB$ или $gradH$ гарантирует и наличие столь необходимого здесь экстремума на характеристике $B \cdot gradB$ или $H \cdot gradH$. На рис. 5 в доказательство этого факта показаны соответствующие характеристики $B \cdot gradB$, найденные указанным приемом с использованием первичных характеристик B , а также аналитически установленных на их основе характеристик $gradB$ (рис. 3) [25].

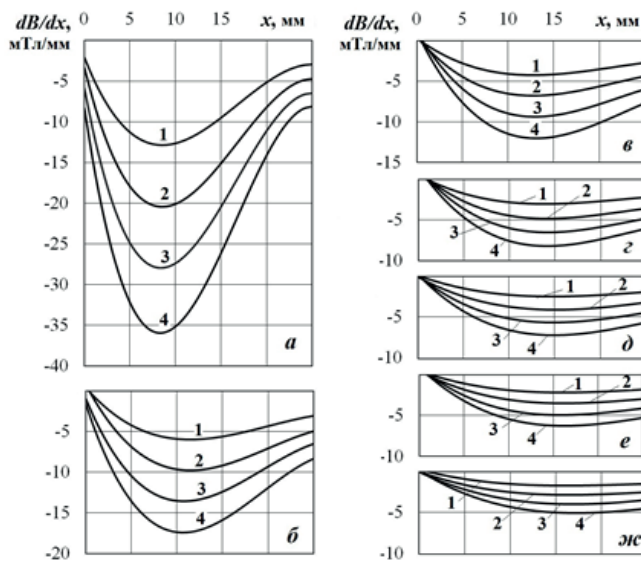


Рис. 3. Координатные характеристики градиента между полюсными наконечниками-полусферами диаметром 100 мм при их взаимном удалении $b=3.5$ мм (а); 6 мм (б); 8 мм (в); 10 мм (з); 11.5 мм (д); 13 мм (е); 15.3 мм (ж); 1 – $I=4$ А, 2 – $I=8$ А, 3 – $I=16$ А, 4 – $I=30$ А.

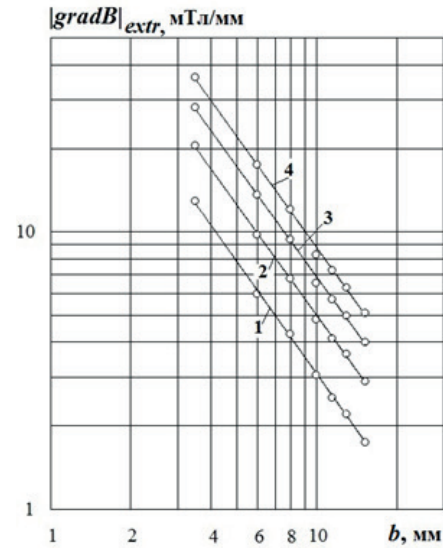


Рис. 4. Иллюстрация степенной зависимости экстремума градиента от взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер (по факту квазилинеаризации этих данных в логарифмических координатах): 1 – $I=4$ А, 2 – $I=8$ А, 3 – $I=16$ А, 4 – $I=30$ А.

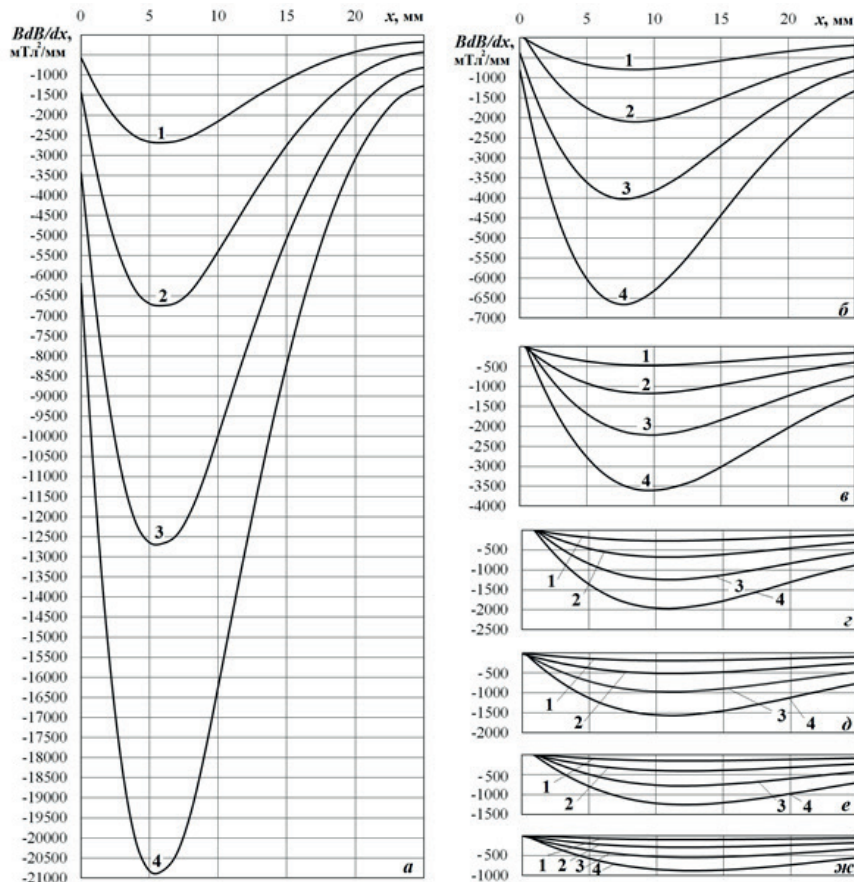


Рис. 5. Координатные характеристики магнитного силового фактора между полюсными наконечниками-полусферами диаметром 100 мм при их взаимном удалении $b=3.5$ мм (а), 6 мм (б), 8 мм (в), 10 мм (з), 11.5 мм (д), 13 мм (е), 15.3 мм (ж); 1 – $I=4$ А, 2 – $I=8$ А, 3 – $I=16$ А, 4 – $I=30$ А.

Как и ожидалось, найденные координатные характеристики $B \cdot gradB$, также хорошо аппроксимируемые полиномом четвертой степени, имеют экстремальный вид, причем такой вид присущ различным случаям взаимного удаления b полюсных наконечников – от $b=3.5$ мм до $b=15.3$ мм (рис. 5). Примечательно, что абсциссы экстремумов магнитного силового фактора $B \cdot gradB$ (рис. 5), несмотря на широкий диапазон изменения токовой нагрузки, для каждого из вариантов b остаются весьма близкими между собой. Это указывает на возможность неизменного позиционирования изучаемого образца в магнитной системе магнетометра при изменении режимов исследований.

Заметим также, что значения абсцисс экстремумов характеристик $BgradB$ (рис. 5) оказались заметно меньше чем значения абсцисс экстремумов характеристик $gradB$ (рис. 3) [25] в 1.3-1.4 раза, практически независимо от взаимного удаления b полюсных наконечников. Другими словами, экстремум значений магнитного силового фактора $BgradB$ между полюсными наконечниками-полусферами находится заметно ниже, на 30-40% ближе к осевой линии полюсов, чем экстремум значений градиента $gradB$.

Разумеется, зону в окрестности экстремума координатной характеристики $BgradB$ вполне можно считать своеобразным «плато» – зоной сравнительно стабильных значений $BgradB$, т.е. ответственной за координацию в ней изучаемого образца. При этом в изучаемой области между указанными наконечниками-полусферами диаметром 100 мм протяженность этой зоны составляет (по x): от $(x_{extr} - 2...3$ мм) до $(x_{extr} + 2...3$ мм). Сама же величина x_{extr} при увеличении значений b смещается в сторону больших значений x (рис. 6а). Используя данные рис.6а, можно получить аналитическую (феноменологическую) зависимость влияния взаимного удаления b полюсных наконечников на значения координаты экстремума магнитного силового фактора x_{extr} . Так, представление этих данных в полулогарифмических координатах показывает, что они достаточно хорошо здесь квазилинеаризуются (рис. 6б), демонстрируя тем самым склонность к логарифмической функции:

$$x_{extr} = x_* \ln \frac{b}{b_*}, \quad (3)$$

где феноменологические параметры x_* и b_* составляют здесь $x_* = 4.7$ мм и $b_* = 1.01$ мм.

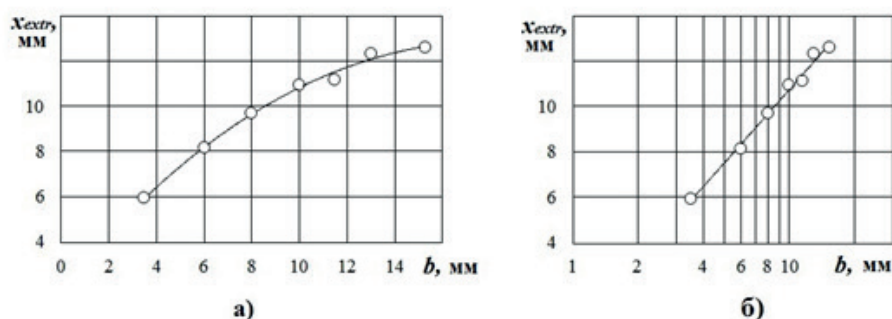


Рис. 6. Зависимость абсциссы экстремума магнитного силового фактора (условного центра зоны его стабильности) от взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер (а) и квазилинеаризация этих данных в полулогарифмических координатах (б) – для получения логарифмической функции (3).

Например, при взаимном удалении полюсных наконечников $b=10$ мм координата экстремума магнитного силового фактора составляет $x_{extr} = 11$ мм, а размер зоны практически стабильных значений параметра $BgradB$ (в окрестности экстремума) составляет от $(11 - 2...3)$ мм = 8...9 мм до $(11 + 2...3)$ мм = 13...14 мм, что непосредственно видно на рис. 5г.

Полученный массив данных (рис. 5) позволяет также найти закономерность убывания экстремальных значений магнитного силового фактора, а именно $|BgradB|_{extr}$, при увеличении взаимного удаления полюсных наконечников b (рис. 7). Как и соответствующая закономерность для экстремума градиента $|gradB|_{extr}$ (рис.4), она, квазилинеаризуясь в логарифмических координатах, оказалась убывающей степенной, но здесь – с показателем степени 2.15: $|BgradB|_{extr} \sim b^{-2.15}$.

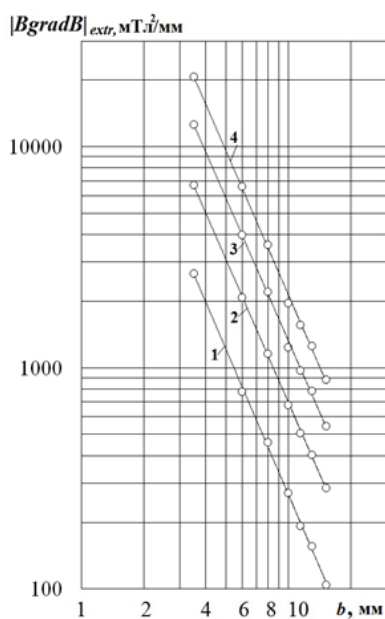


Рис. 7. Степенная зависимость экстремума магнитного силового фактора от взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер по факту квазилинеаризации этих данных в логарифмических координатах: 1 – $I=4$ А, 2 – $I=8$ А, 3 – $I=16$ А, 4 – $I=30$ А.

Заключение

В работе дана оценка принципиальным положениям и направлениям в создании устройств (магнетометров) для реализации метода Фарадея. Обосновано критическое отношение к рекомендованному применению постоянных магнитов, не обеспечивающему стабильность градиента и силового фактора, а также к рекомендованному углу взаимного наклона катушек в магнетометрах, обеспечивающему стабильность градиента, но не силового фактора.

Выполнен комплекс исследований, направленных на выявление координат и размеров локальной, ответственной за расположение образцов малых размеров, зоны со стабильными значениями силового фактора между рекомендуемыми полюсными наконечниками-полусферами магнетометра Фарадея диаметром 100 мм.

Найдена связь координаты экстремума силового фактора, которая в 1.3-1.4 раза меньше координаты экстремума градиента, с расстоянием между полюсными наконечниками:

в принятом диапазоне этого расстояния – от 3.5 до 15.3 мм, которая оказалась близкой к логарифмической. В то же время связь экстремальных значений силового фактора с этим расстоянием проявляется как достаточно сильная обратная степенная.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60034 мол_a_дк и поддержке Минобрнауки РФ по Госзаданию в сфере научной деятельности № 9.9626.2017.

Литература / References:

1. Baskar D., Adler S.B. High temperature Faraday balance for in situ measurement of magnetization in transition metal oxides // Review of Scientific Instruments. 2007. V. 78. P.023908 (1-6).
2. Moze O., Giovanelli L., Kockelmann W., de Groot C.H., Boer F.R., Buschow K.H.J. Structure and magnetic properties of $\text{Nd}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ga}_x$ compounds studied by magnetic measurements and neutron diffraction // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1998. V. 189. P. 329–334.
3. Klaase J.C.P. The Faraday balance, Van der Waals- Zeeman Institute, November 1999, URL: <http://www.science.uva.nl/research/cmp/klaasse/fdb.html>, as of December 2014.
4. Gaucherand F., Beaugnon E. Magnetic texturing in ferromagnetic cobalt alloys // Physica B. 2004. V. 346-347. P. 262–266.
5. Caignaert V., Maignan A., Pralong V., Hébert S., Pelloquin D. A cobaltite with a room temperature electrical and magnetic transition: YBaCo_4O_7 // Solid State Sciences. 2006. V. 8. P. 1160–1163.
6. Zhang C.P., Chaud X., Beaugnon E., Zhou L Crystalline phase transition information induced by high temperature susceptibility transformations in bulk PMP-YBCO superconductor growth in-situ // Physica C. 2015. V. 508. P. 25–30.
7. Bombik A., Leśniewska B., Pacyna A.W. Magnetic susceptibility of powder and single-crystal TmFeO_3 orthoferrite // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2000. V. 214. P. 243–250.
8. Kobayashi H., Tabuchi M., Shikano M., Kageyama H., Kanno R. Structure, and magnetic and electrochemical properties of layered oxides, Li_2IrO_3 // Journal of Materials Chemistry. 2003. V. 13. P. 957–962.
9. Seidov Z., H.-A. Krug von Nidda, Hemberger J., Loidl A., Sultanov G., Kerimova E., Panfilov A. Magnetic susceptibility and ESR study of the covalent-chain antiferromagnets TlFeS_2 and TlFeSe_2 // Physical Review B. 2002. V. 65. P. 014433 (1-7).
10. Slobinsky D., Borzi R.A., Mackenzie A.P., Grigera S.A. Fast sweep-rate plastic Faraday force magnetometer with simultaneous sample temperature measurement // Review of Scientific Instruments. 2012. V. 83. P. 125104 (1-5).
11. Gopalakrishnan R., Barathan S., Govindarajan D. Magnetic susceptibility measurements on fly ash admixed cement hydrated with groundwater and seawater // American Journal of Materials Science. 2012. № 2 (1). P. 32–36.
12. Mexner W., Heinemann K. An improved method for relaxation measurements using a Faraday balance // Review of Scientific Instruments. 1993. V. 64 (11). P. 3336–3337.
13. Sandulyak D.A., Sandulyak A.A., Sleptsov V.V., Sandulyak A.V., Kiselev D.O.,

Matveev V.V. Development of a Combined Empirical and Computational Method of Multiple-Operation Magnetic Monitoring of Ferrous Particles // *Measurement Techniques*. 2016. V. 59. Is. 5. P. 526–531.

14. Сандуляк А.А., Полисмакова М.Н., Ершов Д.В., Сандуляк А.В., Ершова В.А., Сандуляк Д.А. Функциональная экстраполяция массово-операционной характеристики магнетофореза как основа прецизионного метода контроля ферро-частиц // *Измерительная техника*. 2010. № 8. С. 57–60.

Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Ershov D.V., Sandulyak A.V., Ershova V.A., Sandulyak D.A. Functional extrapolation of the mass-operational characteristic of magnetophoresis as a basis for a precision method of monitoring ferroparticles // *Measurement Techniques*. 2010. V. 53. Is. 8. P. 914–918.

15. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Belgacem F.B.M., Kiselev D. Special solutions for magnetic separation problems using force and energy conditions for ferroparticles capture // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2016. V. 401. P. 902–905.

16. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Ershova V.A. Use of the magnetic test-filter for magnetic control of ferroimpurities of fuels, oils, and other liquids (phenomenological and physical models) // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. V. 426. P. 714–720.

17. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Polismakova M.N. Alternatives of multiparameter expressions for filtration magnetophoresis efficiency // *International Journal of Applied Physics*. 2016. V. 1. P. 62–68.

18. Franzreb M., Siemann-Herzberg M., Holey T. J., Thomas O.R.T. Protein purification using magnetic adsorbent particles // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2006. V. 70. P. 505–516.

19. Sandulyak D.A., Snedkov A.B., Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Ablava A.E. Functional properties of granular and quasi-granular ferromagnetic material (filter-matrix) in magnetophoresis technology // *Proceedings of the International Conference on «Materials Engineering for Advanced Technologies»*. London. June 2015. P. 663–665.

20. Blach T.P., Gray E. MacA. A Faraday magnetometer for studying interstitially modified ferro-magnets // *Meas. Sci. Technol.* 1994. V. 5. P. 1221–1225.

21. Riminucci A., Uhlarz M., De Santis R., Herrmannsdörfer T. Analytical balance-based Faraday magnetometer // *Journal of Applied Physics*. 2017. V. 121. P. 094701 (1-5).

22. Hosu B.G., Jakab K., Bánki P., Tóth F.I., Forgacs G. Magnetic tweezers for intracellular applications // *Review of Scientific Instruments*. 2003. V. 74. № 9. P. 4158–4163.

23. Marcon P., Ostanina K. Overview of methods for magnetic susceptibility measurement // *PIERS Proceedings, Malaysia, Kuala Lumpur. March 27-30, 2012*. P. 420–424.

24. Reutz S., Herlach D.M. Measuring magnetic susceptibility of undercooled co-based alloys with a Faraday balance // *Advanced Engineering Materials*. 2001. V. 3. № 1–2. P. 65–67.

25. Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Полисмакова М.Н., Киселев Д.О., Сандуляк Д.А. Подход к координации малообъемного образца при реализации пондеромоторного метода определения его магнитной восприимчивости // *Российский технологический журнал*. 2017. Т. 5. №2. С. 57–69.

Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Polismakova M.N., Kiselev D.O., Sandulyak D.A. An approach for choosing positioning of small volume sample at instantiation ponderomotive

Faraday method in determining its magnetic susceptibility // Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal (Russian Technological Journal). 2017. № 2. P. 57–69. (in Russ.).

26. Govindarajan D., Gopalakrishnan R. Magnetic susceptibility measurements on metakaolin admixed cement hydrated with ground water and sea water // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2009. V. 16. № 3. P. 349–354.

27. Cape J.A., Young R.A. Canted Helmholtz coils for constant-gradient Faraday balance magnetometry // Review of Scientific Instruments. 1971. V. 42. № 7. P. 1061–1063.

28. Finot E., Thundat T., Lesniewska E., Goudonnet J.P. Measuring magnetic susceptibilities of nanogram quantities of materials using microcantilevers // Ultramicroscopy. 2001. V. 86. P. 175–180.

Об авторах:

Сандуляк Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры "Приборы и информационно-измерительные системы" Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (107996, г. Москва, ул. Стромынка, д. 20).

Сандуляк Анна Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры "Приборы и информационно-измерительные системы" Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (107996, г. Москва, ул. Стромынка, д. 20).

Полисмакова Мария Николаевна, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры "Приборы и информационно-измерительные системы" Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (107996, г. Москва, ул. Стромынка, д. 20).

Киселев Дмитрий Олегович, аспирант кафедры "Приборы и информационно-измерительные системы" Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (107996, г. Москва, ул. Стромынка, д. 20).

Сандуляк Дарья Александровна, кандидат технических наук, инженер ООО "Градиент М" (107996, г. Москва, ул. Стромынка, д.19, корп. 2).

About authors:

Alexander V. Sandulyak, Dr.Sc. (Engineering), Professor, Chair "Instruments and Information-Measuring Systems" of the Institute of Complex Security and Special Instrumentation of the Moscow Technological University (20, Stromynka street, Moscow 107996, Russia).

Anna A. Sandulyak, Dr.Sc. (Engineering), Professor, Chair "Instruments and Information-Measuring Systems" of the Institute of Complex Security and Special Instrumentation of the Moscow Technological University (20, Stromynka street, Moscow 107996, Russia).

Maria N. Polismakova, Ph.D. (Engineering), Senior Lecturer, Chair "Instruments and Information-Measuring Systems" of the Institute of Complex Security and Special Instrumentation of the Moscow Technological University (20, Stromynka street, Moscow 107996, Russia).

Dmitriy O. Kiselev, Postgraduate Student, Chair "Instruments and Information-Measuring Systems" of the Institute of Complex Security and Special Instrumentation of the Moscow Technological University (20, Stromynka street, Moscow 107996, Russia).

Darya A. Sandulyak, Ph.D. (Engineering), Engineer of LLC «Gradient M» (19/2, Stromynka street, Moscow 107996, Russia).