УДК 537.621.4

ПОДХОД К КООРДИНАЦИИ МАЛООБЪЕМНОГО ОБРАЗЦА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПОНДЕРОМОТОРНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕГО МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ

А.А. Сандуляк, д.т.н., профессор
А.В. Сандуляк, д.т.н., профессор
М.Н. Полисмакова, к.т.н., доцент
Д.О. Киселев, аспирант,
Д.А. Сандуляк@, к.т.н., инженер

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

В настоящей работе рассматривается малоизученный вопрос идентификации рабочей зоны (зоны для координации исследуемых образцов малых объемов) в весах Фарадея по определению магнитной восприимчивости образцов пондеромоторным методом на основании специально получаемой координатной характеристики индукции поля между полюсными наконечниками указанных весов. Показано, что такая идентификация может быть вполне результативной в том случае, когда данная характеристика, обычно нелинейная и не поддающаяся желаемой, даже частичной, линейной аппроксимации, имеет перегиб. Тогда появляется возможность объективной линейной аппроксимации определенного участка этой характеристики, т.е. констатации стабильных значений градиента индукции в соответствии с принятым условием позиционирования образца. Становится также возможной иллюстрация экстремального вида характеристики градиента индукции; в окрестности экстремума значения градиента относительно стабильны.

Ключевые слова: весы Фарадея, магнитная восприимчивость, зона размещения образца, характеристики напряженности (индукции), экстремум градиента.

AN APPROACH FOR CHOOSING POSITIONING OF SMALL VOLUME SAMPLE AT INSTANTIATION PONDEROMOTIVE FARADAY METHOD IN DETERMINING ITS MAGNETIC SUSCEPTIBILITY

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

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

The paper observes matter about identification of operating area at Faraday balance (area for positioning of test specimens with a small volume). This matter is given coverage to reference deficiently and it's necessary to evaluate magnetic susceptibility values of specimens – based on purpose obtained coordinate characteristics of magnetic field induction between pole pieces of such balance. The paper shows that such identification may be quite effective when given characteristic (usually it is non-linear and doesn't yield to desired linear even local approximation) is curly, i.e. has an inflection. It may possible making a linear approximation of rather shortly characteristic's response region, i.e. establish a stable value induction gradient (according to accepted criterion sample poisoning). It also may possible getting visualized extremum view of gradient induction characteristic (in the vicinity of its gradient value are relatively stable).

Keywords: Faraday balance, magnetic susceptibility, specimen's positioning area, field density (induction) characteristic, gradient extremum.

Введение

Одним из методов определения магнитной восприимчивости χ тела, малого объема *V,* как сплошного, так и дисперсного – например, порошка является метод Фарадея, заключающийся в измерении (весами Фарадея) действующей на него магнитной (пондеромоторной) силы *F* в создаваемом между полюсными наконечниками поле напряженностью Н и неоднородностью *gradH*. При этом в случае изучения ферро- или ферримагнитного образца получаемые данные измерений могут быть использованы, в частности, для нахождения магнитной восприимчивости собственно материала образца, отдельных частиц дисперсного образца-порошка. Последнее же особенно востребовано, например, для решения широкого круга задач магнитофореза и магнитоконтроля [1–4], когда для получения необходимых сведений о магнитных свойствах отдельных частиц и их материала достаточно использовать выделяемую из той или иной среды пробу малого объема в виде дисперсного образца.

Основой для получения данных по магнитной восприимчивости χ при использовании пондеромоторного метода Фарадея является известное выражение:

$$F = \mu_0 \cdot \chi \cdot V \cdot HgradH,$$

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

Из него вытекает расчетная формула:

$$\chi = F / \mu_0 VHgradH \ . \qquad (1)$$

К числу принципиальных положений метода Фарадея относится обеспечение в предполагаемой зоне размещения образца, т.е. рабочей зоне, небольшой в сравнении с размерами самой межполюсной области стабильной неоднородности поля [5–8]. Данное положение (согласно представлениям [7, 8] – это обеспечение постоянства величины *gradH*, а согласно работам, [5, 6] – постоянства величины *HgradH*) уже длительное время является лишь декларируемым, без достаточного обоснования теоретических и практических предпосылок для его осуществления. При этом имеющиеся многочисленные рекомендации по выбору соответствующей формы полюсных наконечников (в частности, в [5, 6, 8]) сопровождаются комментариями преимущественно общего плана. Они не подкрепляются необходимыми доказательными данными, полезными при постановке и проведении исследований с использованием не только точно таких, но и подобного рода наконечников.

Задача выбора зоны размещения образца, требующая обязательного нахождения координатной (для того или иного направления x внутри межполюсной области) характеристики H и посредством нее – характеристик $gradH$ (и при необходимости $HgradH$), расценивается как сложная [7]. Поэтому нередко предпочтение отдается относительным измерениям восприимчивости, не требующим подобной детализации, а сводящимся к калибровке по образцам с известными магнитными восприимчивостями [7].

1. Вид координатной характеристики *B* (или *H*) как тест для выбора полюсных наконечников и идентификации рабочей зоны

Общий подход к идентификации в межполюсной области той рабочей зоны, которая была бы ответственной за размещение образца и выполнение измерений F, например, зоны стабильного значения $gradH$, вытекает из математических представлений. В пределах рабочей зоны значения напряженности поля H в направлении x действия силы F должны изменяться по линейному закону. Только тогда производную по этому направлению, т.е. в данном случае $gradH = dH/dx$, можно считать постоянной (стабильной) величиной. Для получения соответствующей информации необходимо, таким образом, располагать координатной характеристикой параметра H (зависимостью H от x) в межполюсной области.

Для нахождения координатной характеристики достаточно использовать датчик Холла, являющийся, например, измерительным датчиком миллитесламетра ТПУ-03-2 и других приборов аналогичного назначения. Пошагово смещаясь в избранном направлении x внутри межполюсной области, в том числе и в подлежащей идентификации зоне предполагаемого позиционирования исследуемого образца, можно производить измерения индукции B. Располагая же полученными значениями B, легко перейти к требуемым согласно (1) значениям H как $H = B/\mu_0$ (для воздушной среды межполюсной области).

Найденная координатная характеристика параметра H позволяет однозначно судить о ее функциональном виде в целом и о возможности желаемой линейной аппроксимации какого-либо из ее участков, а также определять характеристику параметра $gradH = dH/dx$. Исходя из полученной информации, нетрудно сделать заключение о местонахождении зоны стабильного значения параметра $gradH$, т.е. рабочей зоны. При этом следует заметить, что в случае замеров значений B для получения сведений, касающихся рабочей зоны, необязательно переходить к параметру H. Можно исходить из координатной характеристики первичного здесь параметра B и получаемой из нее характеристики $gradB = dB/dx$. Более того, для расчета значений магнитной восприимчивости χ исследуемого образца необязательно прибегать к расчетной формуле (1). Вместо (1), учитывая уже упоминавшуюся для воздушной межполюсной области связь $H = B/\mu_0$, достаточно пользоваться эквивалентной расчетной формулой:

$$\chi = F\mu_0 / VBgradB\ . \qquad (2)$$

Таким образом, получение и последующий анализ функционального вида зависимости H от x или B от x должны квалифицироваться как исключительно необходимый шаг к обоснованию выбора полюсных наконечников и позиционирования исследуемых образцов при реализации пондеромоторного метода Фарадея. Действительно, только с помощью такой зависимости можно объективно судить о возможности создания между полюсными наконечниками зоны стабильного значения параметра *gradH* (*gradB*) и определения ее местоположения. Выбор формы полюсных наконечников можно считать удачным лишь тогда, когда полученная координатная характеристика H (или B) имеет хотя бы короткий, соразмерный с изучаемым образцом, линейный участок.

2. Особенности идентификации рабочей зоны в межполюсной области: обоснование результативного подхода

Получение для межполюсной области координатной зависимости H (или B), в которой имелся бы необходимый линейный − даже короткий − участок, вряд ли осуществимо без усложнения формы полюсов. Между тем сравнительно доступным представляется подход, согласно которому к рассмотрению должны приниматься только те нелинейные характеристики H (или B), которые имеют перегиб. Тогда относительно небольшой участок в окрестности точки перегиба действительно можно считать близким к желаемому линейному – с почти стабильной величиной *gradH* (*gradB*). Другими словами, соответствующая производная зависимости H (или B) в точке перегиба будет иметь экстремум, окрестность которого можно считать зоной практически стабильного значения *gradH* (*gradB*).

Как показывают результаты теоретических и экспериментальных исследований по намагничиванию цепочки шаров [9–12], в частности, в соленоиде, именно такие нелинейные, имеющие примечательный перегиб, характеристики H присущи областям-зазорам между противостоящими сферическими поверхностями. Речь идет о характеристике H при намагничивании этой цепочки полем напряженностью H_0 в направлении x, начиная с межцентровой линии шаров вдоль «биссектрисы» клинообразного зазора, т.е. в плоскости его симметрии. Соответственно, в точке перегиба этой характеристики H наблюдается выраженный экстремум характеристики dH/dx [9–12].

Следовательно, использование полюсных наконечников сферической формы (рис. 1) можно считать одним из вариантов решения вопроса выбора наконечников в весах Фарадея, разумеется, в виде неконтактирующих тел-полусфер [9], примыкающих плоскими поверхностями к торцевым плоскостям магнитопровода. Поскольку полюсные наконечники представляют собой фигуры типа тел вращения, характеристики H и *gradH* (B и *gradB*) удобно именовать также лучевыми, так как они, начинаясь на осевой линии наконечников, являются идентичными во всех направлениях, нормальных этой линии.

3. Характеристики индукции и ее градиента между сферическими полюсными наконечниками. Идентификация рабочей зоны

На рис. 2а (точки) приведены результаты измерений индукции поля B при различных значениях тока питания I обмотки в плоскости симметрии области между полюсными наконечниками-полусферами (диаметр 100 мм, взаимное удаление по осевой линии b =

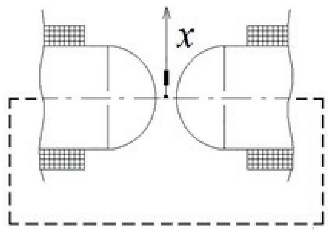

Рис. 1. Вариант создания локальной, располагающейся в окрестности абсциссы перегиба координатной характеристики напряженности или индукции, и соответственно, абсциссы экстремума градиента рабочей зоны между сферическими полюсными наконечниками. Эта зона здесь условно выделена утолщением на оси *x*.

10 мм) на различном расстоянии *x* от осевой линии полюсов. Как и следовало ожидать, отчетливо проявляется перегиб характеристик. Значит, уже на этой стадии анализа можно говорить о реальной возможности линейной аппроксимации данных в окрестности точки перегиба (на рис. 2а показано штриховыми линиями). При этом экстремальным является, соответственно, вид характеристик *gradB* (рис. 2b).

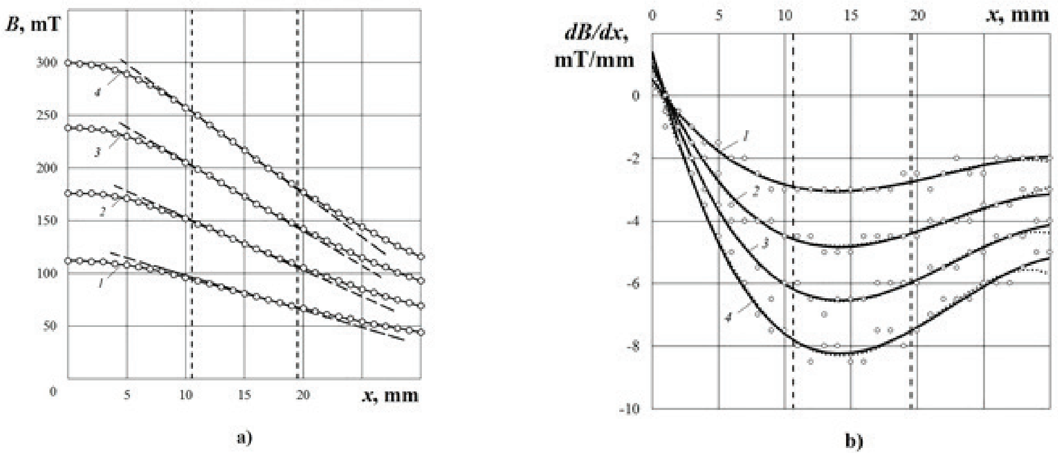

Рис. 2. Координатные характеристики: a) индукции поля *B* (точки – эксперимент, линии – расчет по (3) – *см. далее по тексту*); b) градиента индукции *gradB* (точки – результат графического дифференцирования, пунктирные линии – расчет по (4), сплошные линии – расчет по (5) – *см. далее по тексту*). *1* – *I* = 4 А; *2* – *I* = 8 А; *3* – *I* = 16 А; *4* – *I* = 30 А; *b* = 10 мм.

Чтобы получить характеристики *gradB*, которые дополнительно и наглядно свидетельствуют о рабочих зонах в окрестности экстремума, можно пойти по пути обычного графического дифференцирования характеристик *B* (рис. 2а). Однако использование такого приема вряд ли оправдано. Так, даже в отсутствие разброса данных *B* (изображены точками на рис. 2а, погрешность – в пределах цены деления прибора) на рис. 2b все же наблюдается довольно заметный разброс изображенных точками данных *gradB*. Хотя экстремум в «размытом» виде и проявляется, но в отсутствие четкой информации о его абсциссе.

Более предпочтительно представить саму характеристику *B* (рис. 2а, точки) в виде хорошо аппроксимирующей ее аналитической (феноменологической) зависимости. Тогда посредством последующего математического дифференцирования такой зависимости можно получить довольно точную характеристику *gradB*, причем с четкой идентификацией абсциссы экстремума. Для этого целесообразно прибегнуть, например, к аппроксимации данных *B* полиномом:

$$B = a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + a_5 x^5 + ... + a_0, \qquad (3)$$

ограничиваясь полиномом четвертой, максимум пятой степени.

О результатах аппроксимации данных *B* можно судить, в частности, по линиям на рис. 2a, получаемым с использованием необходимой для этого программы, например, Excel, Advanced Grapher и пр. для полинома пятой степени (табл. 1) и полинома четвертой степени (табл. 2) при индивидуальных значениях коэффициентов a_1, a_2 … и a_0. Как видно из рис. 2a, соответствующие аппроксимирующие зависимости практически идентичны: линии, их описывающие, не раздваиваются и достаточно точно соответствуют исходным экспериментальным данным.

Располагая аналитическими зависимостями (полиномами) для *B* типа (3), легко найти характеристики $gradB = dB/dx$. Для полиномов (3) 5-ой и 4-ой степени характеристики dB/dx примут следующий аналитический вид, соответственно:

$$dB/dx = a_1 + 2a_2 x + 3a_3 x^2 + 4a_4 x^3 + 5a_5 x^4, \qquad (4)$$

$$dB/dx = a_1 + 2a_2 x + 3a_3 x^2 + 4a_4 x^3. \qquad (5)$$

Являясь выраженными экстремальными зависимостями (рис. 2b, пунктирная и сплошная линии, соответственно), они почти полностью согласуются между собой и с результатами графического дифференцирования (рис. 2b, точки).

Заметным является взаимное расхождение (4) и (5) лишь при сравнительно высоких и низких (здесь даже с изменением знака) значениях *x* (рис. 2b). Однако с учетом того, что эти значения совершенно не представляют интерес для решения поставленной задачи (в отличие от столь необходимых значений *x*, близких к абсциссе экстремума $x = x_{extr}$), при обработке данных *B* (рис. 2a) предпочтение следует все же отдать полиному (3) 4-ой степени. Он более простой и к тому же позволяет получить выражение для требуемой абсциссы экстремума $x = x_{extr}$ характеристики *gradB* (рис. 2b) в аналитическом виде.

Действительно, если провести дифференцирование уравнения (5) и обнулить полученное выражение, т.е.

$$2a_2 + 6a_3 x_{extr} + 12a_4 (x_{extr})^2 = 0, \qquad (6)$$

то из установленного квадратного уравнения (6) последует выражение:

$$x_{extr} = \left(-6a_3 + \sqrt{36a_3^2 - 96a_2 a_4}\right) \Big/ 24a_4, \qquad (7)$$

по которому можно вычислять абсциссы экстремумов x_{extr} параметра *gradB*.

Результаты вычислений, содержащиеся в табл. 2, в точности согласуются с результатами, которые непосредственно дает программа Advanced Grapher и к тому же остаются

Таблица 1. Коэффициенты $a_1 \ldots a_5$ и a_0 для полинома (3) 5-ой степени и абсциссы экстремумов (x_{extr}, мм) зависимости (4); b = 10 мм

I, A	a_1	a_2	a_3	$a_4 \cdot 10^{-4}$	$a_5 \cdot 10^{-6}$	a_0	x_{extr}
4	0.3421344	-0.2585787	0.006557	0.3289165	-2.0220361	111.8204351	14.0
8	1.2058422	-0.5444411	0.0220848	-3.8741923	2.6581823	175.7026803	13.97
16	1.0471907	-0.5893002	0.0166821	-0.35620374	-2.7787704	237.6121917	14.25
30	0.9049452	-0.6779417	0.0161148	1.2752554	-5.7270634	299.2743768	14.23
							14.11

Таблица 2. Коэффициенты $a_1 \ldots a_4$ и a_0 для полинома (3) 4-ой степени и абсциссы экстремумов (x_{extr}, мм) зависимости (5); b = 10 мм

I, A	a_1	a_2	a_3	$a_4 \cdot 10^{-4}$	a_0	x_{extr}
4	0.5196166	-0.3027097	0.0105708	-1.1876106	111.6832198	13.87
8	0.9725229	-0.4864262	0.0168083	-1.8805555	175.8830645	14.09
16	1.2910945	-0.6499469	0.022198	-2.4402816	237.4236243	14.18
30	1.4076324	-0.8029349	0.027483	-3.0200421	298.8857383	14.12
						14.06

весьма близкими между собой (отличие от среднего значения – до 1.4%), несмотря на широкий диапазон изменения токовой нагрузки. Следует подчеркнуть, что весьма близки между собой (отличие от среднего значения – до 1%) и абсциссы экстремумов *gradB* в случае обработки данных B (рис. 2а) полиномом (3) 5-ой степени (табл. 1, результаты – из программы Advanced Grapher). Отметим также, что абсциссы экстремумов *gradB* для полинома (3) 4-ой степени (табл. 2) и полинома 5-ой степени (табл. 1) сходны между собой (по средним значениям различие до 0.4%).

Протяженность же самой рабочей зоны, т.е. зоны практически стабильного значения параметра *gradB* (по x) – порядка 8-10 мм (при указанном выше значении взаимного удаления полюсов b = 10 мм – от 10-11 до 19-20 мм). Это отчетливо видно уже на рис. 2а, где штриховые прямые линии показывают возможность линейной аппроксимации участков зависимостей B от x в окрестности точки их перегиба. Соответствующий интервал x выделен штриховыми вертикалями. Кроме того, это наглядно прослеживается на рис. 2b по выделенному интервалу x относительной стабильности величины dB/dx в окрестности экстремумов зависимостей dB/dx от x.

4. О характеристиках индукции и ее градиента между сферическими полюсными наконечниками при их различном взаимном удалении

Описанные выше характеристики индукции поля и градиента индукции (рис. 2) получены для частного случая взаимного удаления полюсных наконечников b = 10 мм. Более полная информация о возможности идентификации рабочей зоны должна последовать из аналогичных исследований, выполненных при иных значениях b.

На рис. 3а−8а (точки) приведены результаты измерений индукции поля B на различном расстоянии x от осевой линии полюсов, при различных значениях тока питания I обмотки в плоскости симметрии области между теми же полюсными наконечниками-полусферами (диаметр 100 мм), но взаимно удаленными на то или иное, отличное от предыдущего, расстояние *b*. Как и ранее, отчетливо проявляется перегиб характеристик *B*, что подтверждает возможность линейной аппроксимации данных в окрестности точки перегиба и, следовательно, получения экстремальных характеристик *gradB*.

Для нахождения таких характеристик, игнорируя не оправдывающее себя здесь графическое дифференцирование экспериментальных характеристик *B*, целесообразно прибегнуть сначала к аппроксимации данных *B* полиномом (3), причем ограничиваясь полиномом 4-ой степени (рис. 3a–8a). Это позволяет воспользоваться выражениями (5) и (7) для получения характеристик *gradB* и абсцисс их экстремумов x_{extr}.

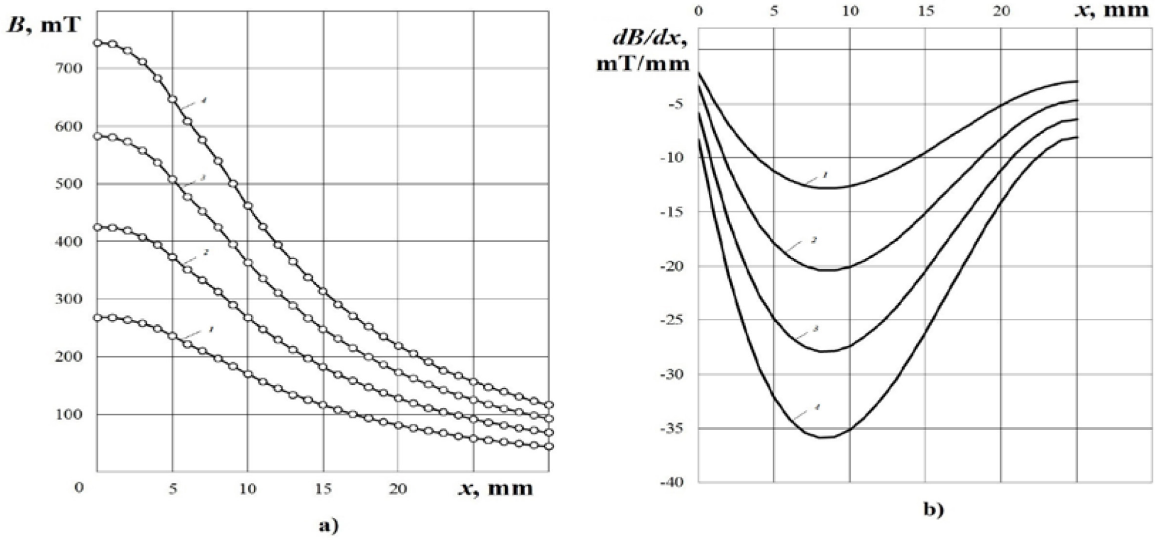

Рис. 3. Координатные характеристики:
а) индукции поля *B:* точки – эксперимент, линии – расчет по (3);
b) градиента индукции *gradB:* линии – расчет по (5).
1 – *I* = 4 А; *2* – *I* = 8 А; *3* – *I* = 16 А; *4* – *I* = 30 А; *b* = 3.5 мм.

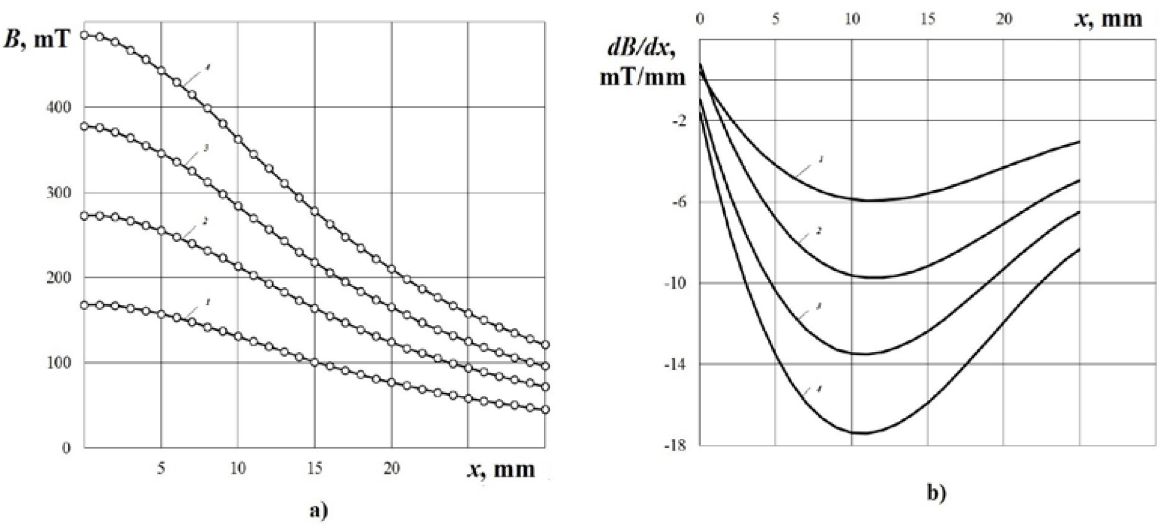

Рис. 4. Координатные характеристики при *b* = 6 мм.
Обозначения аналогичны рис. 3.

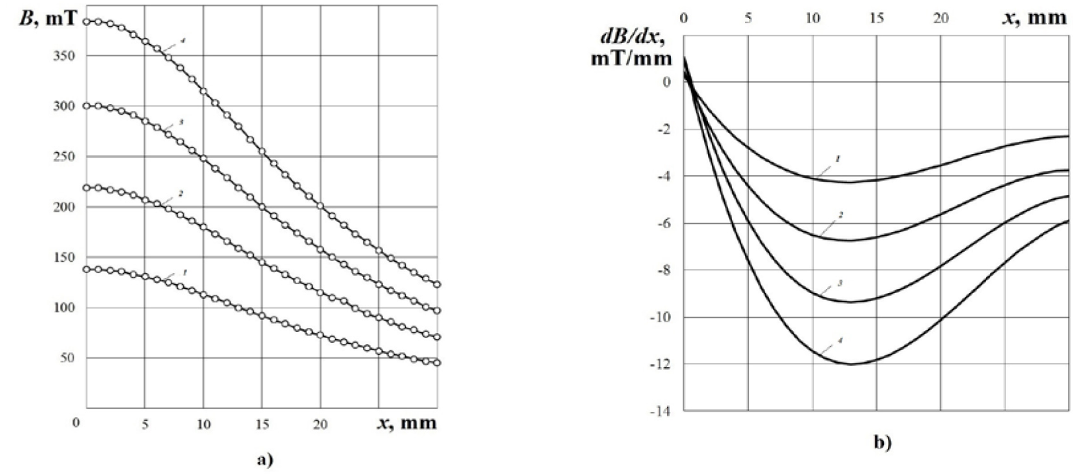

Рис. 5. Координатные характеристики при b = 8 мм.
Обозначения аналогичны рис. 3.

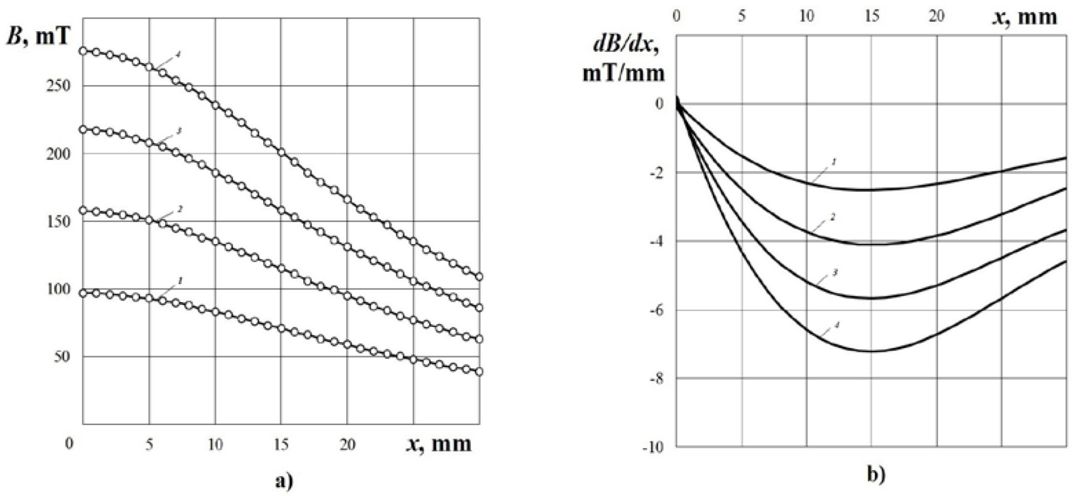

Рис. 6. Координатные характеристики при b = 11.5 мм.
Обозначения аналогичны рис. 3.

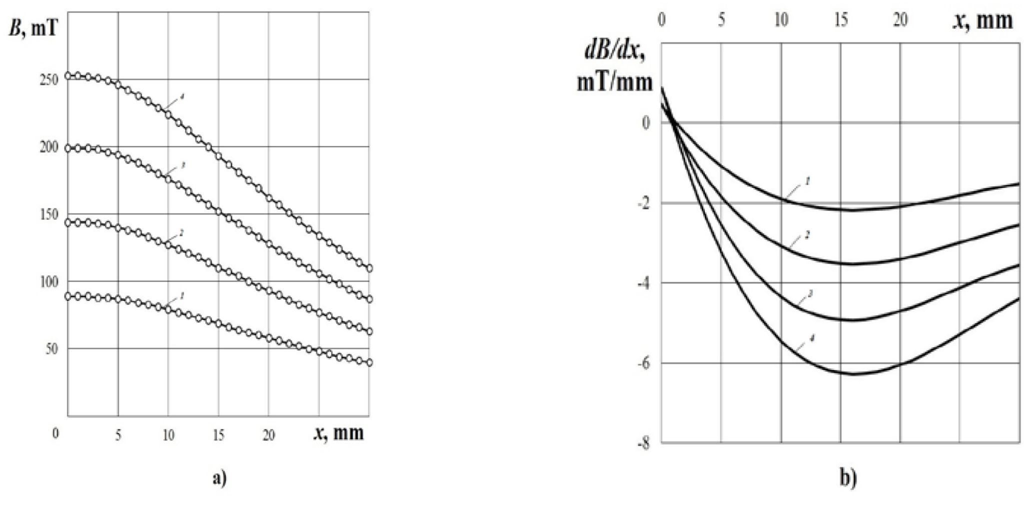

Рис. 7. Координатные характеристики при b = 13 мм.
Обозначения аналогичны рис. 3.

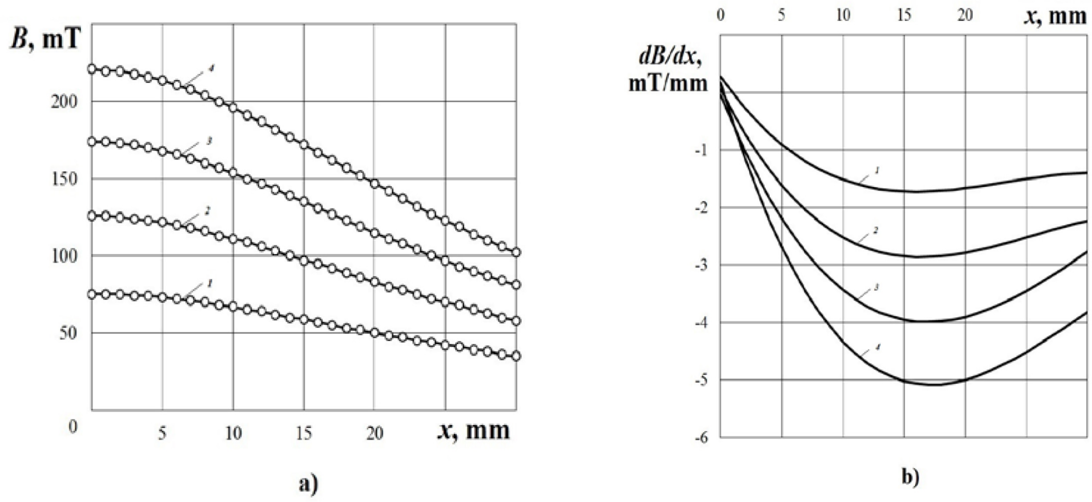

Рис. 8. Координатные характеристики при b = 15 мм.
Обозначения аналогичны рис. 3.

Соответствующие характеристики *gradB* показаны на рис. 3b–8b. Данные x_{extr} содержатся в табл. 3–8, при этом результаты расчета по формуле (7), как и ранее, согласуются с результатами, которые непосредственно дает программа. Эти данные для каждого значения b остаются весьма близкими между собой (отличие от среднего значения до 5%), несмотря на широкий диапазон изменения токовой нагрузки.

Таблица 3. Коэффициенты a_1 … a_4 и a_0 для полинома (3) 4-ой степени и абсциссы экстремумов (x_{extr}, мм) зависимости (5); b = 3.5 мм

I, A	a_1	a_2	a_3	a_4	a_0	x_{extr}
4	-2.1202999	-1.4164925	0.0740774	-0.0011025	271.8367043	8.55
8	-3.3556736	-2.2557458	0.118029	-0.001758	430.6479645	8.55
16	-5.8712794	-2.9654952	0.1574017	-0.002359	591.0292824	8.39
30	-8.3016899	-3.7361271	0.1995795	-0.0029951	755.9803562	8.32
						8.45

Таблица 4. Коэффициенты a_1 … a_4 и a_0 для полинома (3) 4-ой степени и абсциссы экстремумов (x_{extr}, мм) зависимости (5); b = 6 мм

I, A	a_1	a_2	a_3	$a_4 \cdot 10^{-4}$	a_0	x_{extr}
4	0.3737811	-0.6382247	0.0260467	-3.256738	168.2018932	11.44
8	0.7716303	-1.0601878	0.0431712	-5.3834904	273.0586942	11.46
16	-0.9858022	-1.3389038	0.0574855	-7.4142012	377.9734345	10.74
30	-1.6497584	-1.6949379	0.0731517	-9.4550326	485.7462696	10.66
						11.08

Таблица 5. Коэффициенты a_1 … a_4 и a_0 для полинома (3) 4-ой степени и абсциссы экстремумов (x_{extr}, мм) зависимости (5); b = 8 мм

I, A	a_1	a_2	a_3	$a_4 \cdot 10^{-4}$	a_0	x_{extr}
4	0.2925186	-0.4155239	0.0154567	-1.7958737	138.0570122	12.72
8	0.4581271	-0.6585596	0.0245284	-2.8622448	218.9531439	12.73
16	1.0699371	-0.9359993	0.0341451	-3.8831768	299.6555977	12.95
30	1.0108666	-1.1488808	0.0411111	-4.5325416	383.897641	13.10
						12.87

Таблица 6. Коэффициенты $a_1 \dots a_4$ и a_0 для полинома (3) 4-ой степени и абсциссы экстремумов (x_{extr}, мм) зависимости (5); b = 11.5 мм

I, A	a_1	a_2	a_3	$a_4 \cdot 10^{-4}$	a_0	x_{extr}
4	0.0617524	-0.2028761	0.0065072	-0.65122368	96.8685311	14.74
8	-0.0959533	-0.303703	0.0092366	-0.83979559	157.6727618	15.11
16	0.062403	-0.4487526	0.0143175	-1.431742	217.5882784	14.87
30	0.2141931	-0.579886	0.0184111	-1.8243764	275.4018458	14.90
						14.91

Таблица 7. Коэффициенты $a_1 \dots a_4$ и a_0 для полинома (3) 4-ой степени и абсциссы экстремумов (x_{extr}, мм) зависимости (5); b = 13 мм

I, A	a_1	a_2	a_3	$a_4 \cdot 10^{-4}$	a_0	x_{extr}
4	0.4262486	-0.1927864	0.0058346	-0.56757459	88.8496205	16.00
8	0.4547654	-0.291934	0.0087866	-0.85322075	144.0280964	16.12
16	0.8664999	-0.4382663	0.0136864	-1.3972497	198.8536312	15.72
30	0.8664869	-0.5182906	0.0153917	-1.4561138	252.6906374	16.17
						16.0

Таблица 8. Коэффициенты $a_1 \dots a_4$ и a_0 для полинома (3) 4-ой степени и абсциссы экстремумов (x_{extr}, мм) зависимости (5); b = 15.3 мм

I, A	a_1	a_2	a_3	$a_4 \cdot 10^{-5}$	a_0	x_{extr}
4	0.2757113	-0.1509497	0.0047744	-5.0953657	74.8838408	16.01
8	0.0560878	-0.2113118	0.0063297	-6.2024254	125.9145032	16.40
16	-0.0404486	-0.2649482	0.0070865	-5.5187747	174.1185527	16.92
30	0.1663572	-0.353642	0.0096893	-8.2637042	220.6803088	17.23
						16.64

Располагая данными x_{extr}, полученными при различных значениях взаимного удаления полюсных наконечников b, содержащимися в табл. 2–8 и отчетливо проявляющимися на рис. 2b–8b, необходимо отметить следующее. При увеличении b протяженность рабочей зоны остается примерно одинаковой – до 8-10 мм, но ее местоположение, судя по значениям x_{extr}, смещается в сторону бóльших значений x (рис. 9а).

Обработка данных показывает, что они достаточно хорошо квазилинеаризуются в полулогарифмических координатах (рис. 9b), демонстрируя тем самым склонность к логарифмической функции:

$$x_{extr} = x_* \ln \frac{b}{b_*}, \tag{8}$$

где феноменологические параметры x_* и b_* составляют здесь: x_* = 5.67 мм и b_* = 0.817 мм.

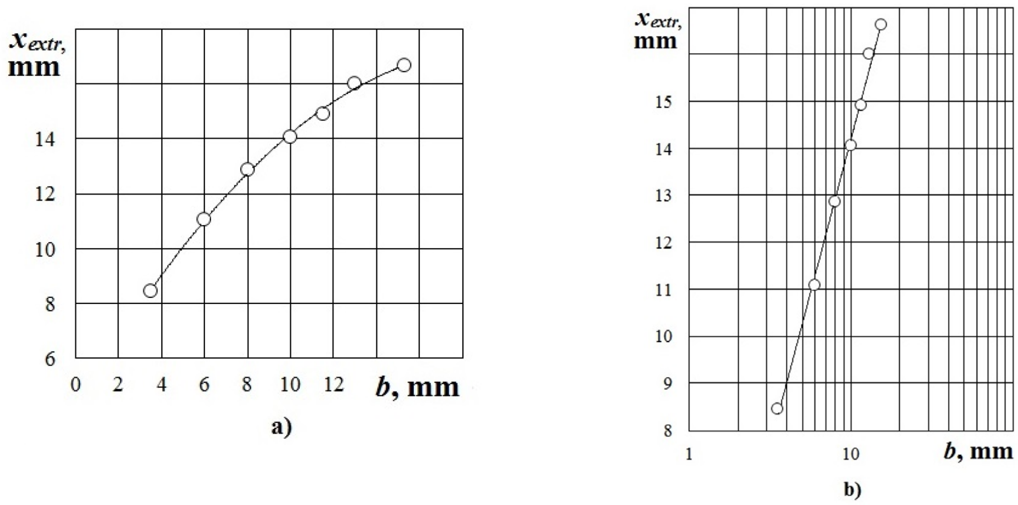

Рис. 9. Зависимость абсциссы экстремума градиента индукции (условного центра рабочей зоны) от взаимного удаления полюсных наконечников (a) и иллюстрация квазилинеаризации этих данных в полулогарифмических координатах (b).

Заключение

На примере полюсных наконечников сферической формы, рекомендованных к использованию в весах Фарадея, предложен и реализован подход к идентификации рабочей зоны, т.е. зоны, в пределах которой следует размещать малый образец для изучения его магнитной восприимчивости. Он основан на получении и анализе координатной характеристики индукции B или напряженности H поля в межполюсной области. Такая характеристика должна обязательно иметь перегиб, что одновременно позволяет говорить о принципиальной пригодности наконечников для весов Фарадея. В окрестности перегиба соответствующий участок характеристики B поддается искусственной линеаризации, что свидетельствует о практически стабильных значениях параметра *gradB* в окрестности экстремума соответствующей характеристики.

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

Литература:

1. Nandy K., Chaudhuri S., Ganguly R. [et al.] Analytical model for the magnetophoretic capture of magnetic microspheres in microfluidic devices // J. Magnetism and Magnetic Materials. 2008. V. 320. Is. 7. P. 1398–1405.

2. Kawano M., Watarai H. Two-dimensional flow magnetophoresis of microparticles // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2012. V. 403. Is. 9. P. 2645–2653.

3. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Fethi B.M. Belgacem, Kiselev D.O. Special solutions for magnetic separation problems using force and energy conditions for ferro-particles capture // J. Magnetism and Magnetic Materials. 2016. V. 401. P. 902–905.

4. Patent USA № 4492921. Sandulyak A.V., Garaschenko V.I., Korkhov O.J. Method of determining the quantity of solid fraction of ferromagnetic matter in a fluid. 1985.

5. Чечерников В.И. Магнитные измерения (изд. 2-е, доп. и перераб.). М.: Изд-во МГУ, 1969. 388 с.

6. Карасик В.Р. Физика и техника сильных магнитных полей. М.: Наука, 1964. 348 с.

7. Казин П. Е., Кульбакин И.В. Методы исследования магнитных свойств материалов. М.: МГУ, 2011. 34 с.

8. http://www.physchem.chimfak.rsu.ru/Source/special/magnetochem_1.html

9. Сандуляк А.В. Очистка жидкостей в магнитном поле. Львов: Высшая школа, 1984. 167 с.

10. Sandulyak A.V., Sandulyak A.A., Ershova V.A. Magnetization curve of a granulated medium in terms of the channel-by-channel magnetization model (new approach) // Doklady Physics. 2007. V. 52. № 4. P. 179–181.

11. Sandulyak A.V., Sandulyak A.A., Ershova V.A. On the model of channel-by-channel magnetization of a granular medium (with a radial permeability profile of a quasi-continuous channel) // Technical Physics. 2009. V. 54. № 5. P. 743–745.

12. Сандуляк А.А., Ершова В.А., Ершов Д.В. [и др.] О свойствах «коротких» гранулированных магнетиков с неупорядоченными цепочками гранул: поле между гранулами // Физика твердого тела. 2010. Т. 52. Вып. 10. С. 1967–1974.