

Сандуляк Анна Александровна

д-р техн. наук, профессор

Сандуляк Александр Васильевич

д-р техн. наук, профессор

Полисмакова Мария Николаевна

канд. техн. наук, доцент

Киселев Дмитрий Олегович

аспирант

Сандуляк Дарья Александровна

канд. техн. наук, инженер

ФГБОУ ВО «Московский технологический университет»

г. Москва

DOI 10.21661/r-462071

МАГНЕТОМЕТР ФАРАДЕЯ С ОБОСНОВАННОЙ КООРДИНАЦИЕЙ ЗОНЫ СТАБИЛЬНОСТИ ГРАДИЕНТА ПОЛЯ

Аннотация: исследователями получены и проанализированы координатные характеристики индукции поля и вытекающие из них характеристики градиента между полюсными наконечниками сферической, конической и конической усеченной формы. Установлено, что только извилистые характеристики индукции, демонстрирующие экстремум градиента, могут гарантировать наличие (в окрестности экстремума, где значения градиента сравнительно стабильны) рабочей зоны, ответственной за размещение микрообразца для изучения его магнитных свойств.

Ключевые слова: весы Фарадея, координатные зависимости, индукция, градиент, экстремум градиента, рабочая зона измерений.

Для решения многих физических и прикладных задач дисперсных веществ, в частности, задач магнитофореза и магнитоконтроля ферро(ферри)магнитной фракции природных и технологических сред [1–3] (в том числе так называемых магнитных и магнитно-реологических жидкостей) важным является получение

информации о магнитной восприимчивости частиц дисперсной фазы. Для этой цели вполне применимы данные восприимчивости конгломератов таких (но разобщенных) частиц χ . Так, при условии низких значений объемной доли γ этих частиц в конгломерате (с помощью неферромагнитных частиц, например, размолотого песка) их восприимчивость находится как χ/γ .

В случае, когда приходится иметь дело со специально выделяемыми, пробными образцами малого объема (малой массы), обнаруживается наиболее приемлемым (в сравнении с широко используемыми в последнее время) давно практикуемый, несколько трудоемкий метод Фарадея. Он основан на измерении пондеромоторной силы $F \sim \chi \cdot V \cdot B \text{grad}B$, а посредством нее – определении восприимчивости χ образца малого объема V , помещаемого между полюсными наконечниками в «точку» с индукцией поля B и неоднородностью $\text{grad}B$.

При использовании магнетометра (весов) Фарадея традиционно проблемным является вопрос выбора координат такой рабочей зоны, в пределах которой неоднородность поля практически стабильна [4–7], в частности, $\text{grad}B \cong \text{Const}$.

Разумеется, это требует обоснования выбора соответствующей формы полюсных наконечников на основании, прежде всего, диагностики (к сожалению, не представленной в литературе) той или иной межполюсной области – для строго адресного размещения образца. Речь идет о получении характеристик индукции B и неоднородности $\text{grad}B$ вдоль определенной координаты x (например, в направлении действия пондеромоторной силы) в межполюсной области.

Координатная характеристика B , являющаяся ключевой, может быть получена посредством мелкошагового перемещения датчика Холла тесламетра. Представляемая в графическом или/и аналитическом виде эта характеристика позволяет найти координатную характеристику параметра $\text{grad}B = dB/dx$, по которой можно судить как о присутствии в изучаемой межполюсной области (или отсутствии вообще) интересующей нас зоны стабильных значений $\text{grad}B$, так и

о координатах ее местонахождения, т.е. координатах зоны для позиционирования изучаемого образца.

Надо сказать, что о факте присутствия такой зоны можно констатировать уже по виду зависимости B от x , а именно по наличию линейного (или близкого к нему) участка, даже короткого (соразмерного с габаритами образца), так как именно в пределах этого участка чисто математически $gradB = dB/dx \cong \text{Const}$.

Поскольку для полюсных наконечников традиционных и специфичных форм зависимости B (или напряженности поля H) от x в межполюсной области в целом являются нелинейными (и без линейных участков), то выбор полюсных наконечников надо сводить к такому варианту, чтобы ключевая характеристика B была извилистой, с перегибом. Тогда ее участок (короткий по отношению ко всей, развернутой нелинейной характеристике) в окрестности точки перегиба, как близкий к желаемому линейному, будет свидетельствовать о почти стабильных здесь значениях $gradB$. Действительно, дифференцирование такой зависимости B от x подтвердит проявление здесь экстремума зависимости $gradB$ от x , в окрестности которого значения $gradB$ практически стабильны.

Именно такого рода нелинейные, имеющие примечательный перегиб, характеристики напряженности поля H наблюдаются для областей между сферическими поверхностями намагничиваемой цепочки шаров [8–10] и, разумеется, экстремальные характеристики неоднородности dH/dx [8–10]. И это указывает на целесообразность использования в весах Фарадея наконечников сферической формы (рис. 1а).

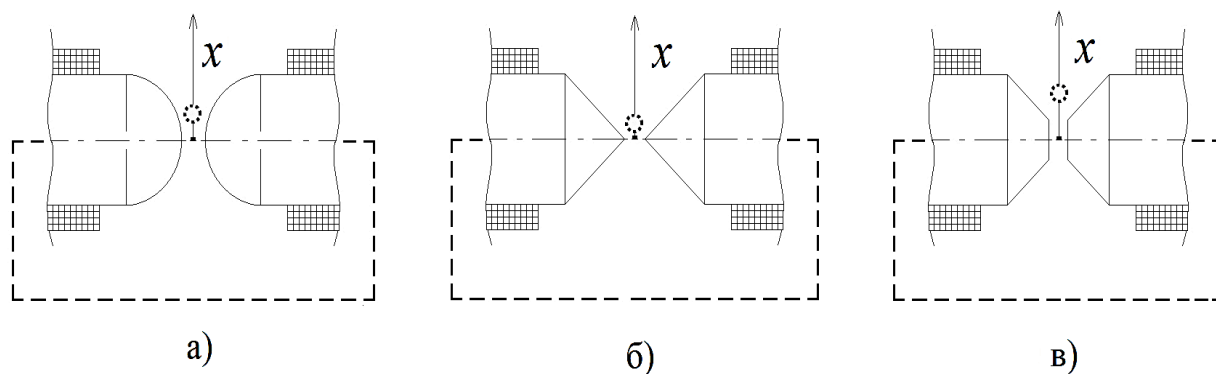


Рис. 1. Иллюстрация полюсных наконечников электромагнитной системы весов Фарадея: сферической (а), конической (б) и конической усеченной (в) формы.

Расположение рабочих зон (условное) – согласно данным рис. 2, 3 как зоны в окрестности абсциссы точки перегиба координатной характеристики индукции и соответственно зоны в окрестности абсциссы экстремума координатной характеристики градиента

Подтверждение такому решению получено в результате проведения измерений индукции B в радиальном направлении (на различном расстоянии x от осевой линии) плоскости симметрии области между полюсными наконечниками-полусферами диаметром 100 мм, взаимно разобращенными на 10 мм (рис. 2). На получаемой координатной характеристике B (при токе питания обмотки электромагнитной системы 16 А) отчетливо замечен перегиб. Значит, в окрестности точки перегиба вполне возможна линейная аппроксимация данных B (на рис. 2а показано штриховой линией), а это свидетельствует о том, что здесь действительно $dB/dx = \text{grad}B \cong \text{Const}$.

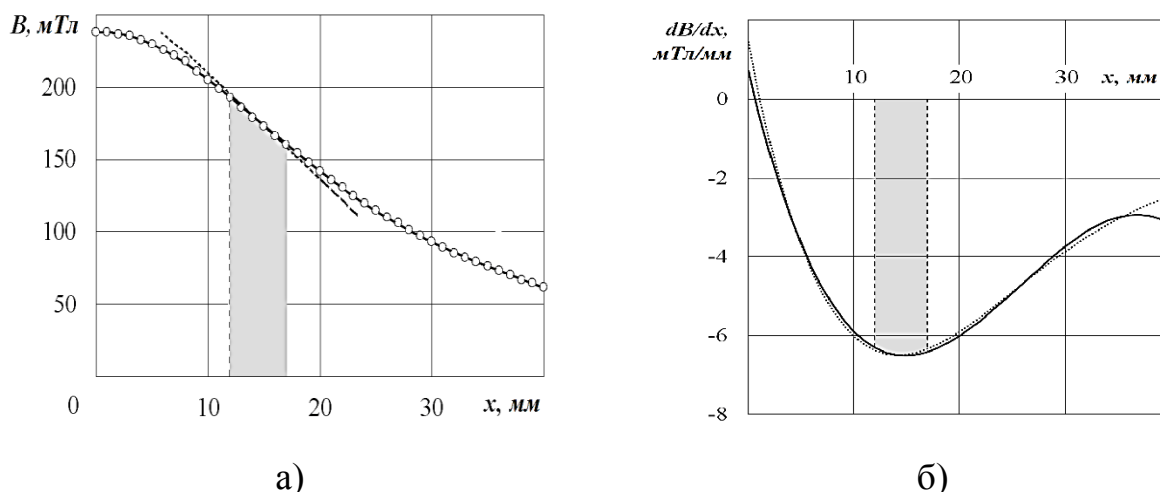


Рис. 2. Координатные характеристики индукции поля (а) и градиента (б) между полюсными наконечниками сферической формы; а) точки – эксперимент, линия – расчет по полиномам 4-ой и 5-той степени (результаты весьма близки); б) сплошная и пунктирная линии – расчет по выражениям, полученным дифференцированием используемых полиномов 4-ой и 5-той степени

Наиболее наглядную картину дает дифференцирование всей кривой B от x , когда координатная характеристика $gradB$ приобретает экстремальный вид (рис. 2б): наличие экстремума свидетельствует о том, что в его окрестности величина $gradB$ действительно практически стабильна.

Следует отметить, что получению характеристики $gradB$ (рис. 2б, линии – как результат дифференцирования изображенной на рис. 2а характеристики B) должна предшествовать аналитическая (феноменологическая) аппроксимация данных B (рис. 2а, точки). Для этого вполне подходящими являются полиномы 4-ой или 5-ой степени. На рис. 2а они иллюстрируются практически единой (здесь сплошной) линией, хорошо описывающей исходные экспериментальные данные (точки), а на рис. 2б производные этих полиномов иллюстрируются сплошной и пунктирной линиями – весьма близкими друг к другу (прежде всего, в представляющей наибольший интерес области в окрестности экстремума).

Все же, когда стоит вопрос о выборе степени полинома для аппроксимации данных B , более предпочтительным представляется полином 4-ой степени,

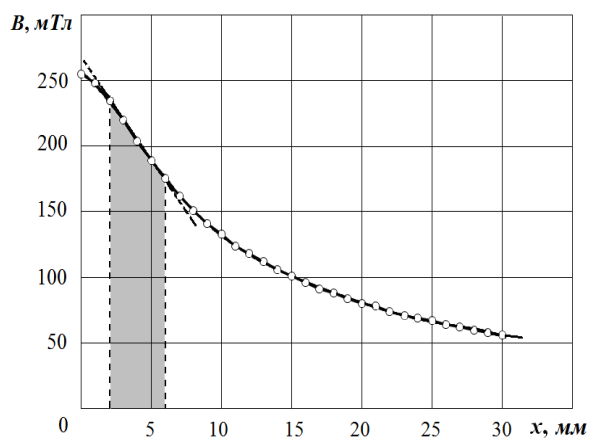
т.е. $B=a_0+a_1x+a_2x^2+a_3x^3+a_4x^4$ с присущими для него коэффициентами a_0, a_1, a_2, a_3 и a_4 , так как его использование дает возможность получить формулу для расчета абсциссы экстремума $x = x_{extr}$ характеристики $gradB$ в аналитическом виде. Так, требующееся в подобных случаях математического анализа двойное дифференцирование этого полинома и последующее обнуление полученного выражения приводит к квадратному, решаемому относительно $x=x_{extr}$, уравнению и получению формулы:

$$x_{extr} = \left(-6a_3 + \sqrt{36a_3^2 - 96a_2a_4} \right) / 24a_4 . \quad (1)$$

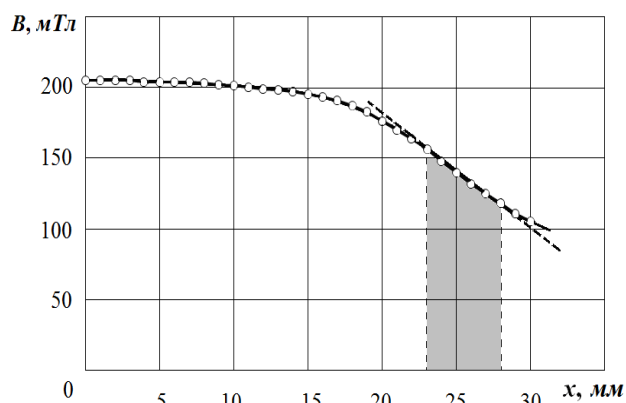
Исследования показали, что в области между указанными наконечниками сферической формы сама рабочая зона, т.е. зона практически стабильных значений $gradB$, располагается на расстоянии x от осевой линии полюсных наконечников в диапазоне $x \cong 12-17$ мм (рис. 2) при собственном размере этой зоны, т.е. допустимом размере изучаемого образца, порядка 5 мм.

Что касается иных, в том числе традиционных (используемых в магнетометре Фарадея), форм полюсных наконечников, то подход к идентификации рабочей зоны тоже должен основываться на получении и анализе координатной характеристики индукции B (напряженности H) поля в межполюсной области.

В частности, для областей между такими же по диаметру и взаимному удалению наконечниками, но конической формы (рис. 1б, угол при вершине 90°) и усеченной конической формы (рис. 1в, диаметры 100 мм/ 40 мм) координатные нелинейные характеристики B тоже являются извилистыми (рис. 3). Это позволяет говорить о пригодности (в принципе) таких полюсных наконечников для магнитной системы магнетометра Фарадея.



а)



б)

Рис. 3. Координатные характеристики индукции поля между полюсными нако-
нечниками конической формы (рис. 1б, диаметр 100 мм, угол при вершине 90°)
и усеченной конической формы (рис. 1в, перепад диаметров 100 мм/ 40 мм)

В окрестности точки перегиба каждой из этих извилистых характеристик (рис. 3) соответствующий ее участок может быть искусственно линеаризован (иллюстрируется прямыми штриховыми линиями на рис. 3), что свидетельствует о практически стабильных здесь значениях $gradB$ (после дифференцирования зависимости B от x – в окрестности экстремума соответствующей зависимости $dB/dx = gradB$ от x).

Судя по данным на рис.3, рабочие зоны, т.е. зоны практически стабильных значений $gradB$, располагаются на расстояниях x от осевой линии полюсов в диапазонах $x \cong 2-6$ мм для конусных наконечников и $x \cong 23-28$ мм для усеченных конусных наконечников (индивидуальные диапазоны x на рис. 3 затемнены). По сравнению с полюсными наконечниками сферической формы в первом случае рабочая зона располагается ближе к осевой линии наконечников, а во втором – дальше от нее.

Таким образом, вопрос идентификации рабочей, имеющей ограничения, зоны в межполюсной области магнетометра Фарадея (зоны для позиционирования исследуемых образцов малых размеров при измерении пондеромоторной

силы и изучении их магнитной восприимчивости), как имеющий принципиальное значение, нуждается в детальном изучении, прежде всего, предполагающем получение координатных характеристик индукции (напряженности) поля между полюсными наконечниками. При этом следует признать, что обычно нелинейная и не поддающаяся желаемой, даже частичной, линейной аппроксимации (для констатации стабильных значений здесь градиента индукции, т.е. в соответствии с принятым условием позиционирования образца) характеристика лишь в том случае свидетельствует о наличии рабочей зоны, когда является извилистой, т.е. имеет перегиб. И только в этом случае появляется возможность объективной линейной аппроксимации сравнительно короткого участка этой характеристики (в окрестности точки перегиба, где значения градиента относительно стабильны). Дополнительно это может быть проиллюстрировано соответствующим экстремальным видом характеристики градиента индукции: в окрестности экстремума значения градиента действительно относительно стабильны.

Список литературы

1. Sandulyak A.A. Special solutions for magnetic separation problems using force and energy conditions for ferro-particles capture / A.A. Sandulyak, A.V. Sandulyak, Fethi B.M. Belgacem [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2016. – V. 401. – P. 902–905.
2. Sandulyak A.A. Use of the magnetic test-filter for magnetic control of ferroimpurities of fuels, oils, and other liquids (phenomenological and physical models) / A.A. Sandulyak, A.V. Sandulyak, V.A. Ershova [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2017. – V. 426. – P. 714–720.
3. 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.
4. Чечерников В.И. Магнитные измерения. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Изд-во МГУ, 1969. – 388 с.

5. Карасик В.Р. Физика и техника сильных магнитных полей. – М.: Наука. – 1964. – 348 с.
6. Казин П.Е. Методы исследования магнитных свойств материалов / П.Е. Казин, И.В. Кульбакин. – М.: МГУ, 2011. – 34 с.
7. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.physchem.chimfak.rsu.ru/Source/special/magnetochem_1.html
8. Сандуляк А.В. Кривая намагничивания гранулированной среды с позиций модели поканального намагничивания (новый подход) / А.В. Сандуляк, А.А. Сандуляк, В.А. Ершова // Доклады Академии Наук. – 2007. – №4. – Т. 413. – С. 469–471.
9. Сандуляк А.В. К вопросу о модели поканального намагничивания гранулированной среды (с радиальным профилем проницаемости квазисплошного канала) / А.В. Сандуляк, А.А. Сандуляк, В.А. Ершова // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79. – Вып. 5. – С. 140–143.
10. Сандуляк А.А. О свойствах «коротких» гранулированных магнетиков с неупорядоченными цепочками гранул: поле между гранулами / А.А. Сандуляк, В.А. Ершова, Д.В. Ершов [и др.] // Физика твердого тела. – 2010. – Т. 52. – Вып. 10. – С. 1967–1974.