

УДК 537.621;621.8.038

© Д. А. Сандуляк, А. С. Харин, А. А. Сандуляк, М. Н. Полисмакова,
А. В. Сандуляк, Д. А. Головченко, А. Д. Косенков, 2025

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ СТАБИЛЬНОСТИ МАГНИТНОЙ СИЛЫ В МАГНИТОМЕТРЕ КОНТРОЛЯ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ЧАСТИЦ

Для обеспечения корректных условий при контроле магнитной восприимчивости частиц в магнитометрах пондеромоторного и/или магнитно-реологического типов особенно важным является этап идентификации рабочей (исполнительной) зоны для выполнения такого контроля. В связи с этим предложен новый метод по идентификации этой зоны, отличительной особенностью которого является применение (для диагностики поля между полюсными наконечниками) шарообразного датчика-феррозонда, воспринимающего действие магнитной силы F при удалении x от межцентрового расстояния полюсных наконечников в определенном (по линии действия магнитной силы) направлении. Проведены серии экспериментов с варьированием диаметра d датчика и намагничивающей силы $I\omega$ магнитометра.

Ключевые слова: магнитометр для контроля магнитной восприимчивости, метод идентификации рабочей зоны, стабильность магнитной силы, шарообразный датчик-феррозонд

EDN: ZMRWTZ

ВВЕДЕНИЕ

Для решения актуальной задачи определения магнитной восприимчивости χ объектов малого объема (частиц) как задачи тонкой диагностики наиболее приемлемым принято считать пондеромоторный метод (альтернативное название — весы Фарадея, Faraday balance) [1–6]. Также получает развитие магнитно-реологический метод [7, 8] (частично основывающийся на пондеромоторном принципе). При этом оба эти метода результативно реализованы в измерительной системе — магнитометре с намагничиваемыми полюсными наконечниками сферической формы.

В основе методики подобного рода эксперимента по установлению значения χ изучаемого объекта лежит выражение для пондеромоторной (магнитной) силы F :

$$F = \mu_0 \cdot \chi \cdot V \cdot H \operatorname{grad} H,$$

или

$$F = \frac{\chi \cdot V \cdot B \operatorname{grad} B}{\mu_0},$$

воздействующей на этот объект, размещенный между полюсными наконечниками, где χ и V — его магнитная восприимчивость и объем, H и B — напряженность и индукция магнитного поля, $H \operatorname{grad} H$, или $B \operatorname{grad} B$, — магнитный силовой фак-

тор, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м — абсолютная магнитная проницаемость вакуума.

В этой связи повышенный интерес представляет этап диагностики поля между полюсными наконечниками — с обязательной идентификацией строго определенной рабочей (исполнительной) зоны между полюсными наконечниками для выполнения исследований, зоны, которая должна характеризоваться сравнительно стабильными (вдоль установленного направления) значениями магнитного силового фактора $H \operatorname{grad} H$, или $B \operatorname{grad} B$. Стоит отметить, что данный этап диагностики долгое время оставался без обоснованной методики по его выполнению и требовал существенной проработки. Такая ситуация объяснялась отчасти сложностью достижения указанной стабильной неоднородности поля и продолжающейся дискуссией по поводу того, какая из магнитных характеристик поля здесь предпочтительнее — $\operatorname{grad} H$ ($\operatorname{grad} B$) или $H \operatorname{grad} H$ ($B \operatorname{grad} B$) [6, 9–11].

Впоследствии в работах [12, 13] был предложен экспериментально-аналитический метод такой диагностики при применении полюсных наконечников сферической формы. Он заключается в экспериментальном пошаговом определении магнитной индукции B (или напряженности H) вдоль заданного направления $\vec{x}$ между наконечниками, т.е. вдоль линии действия магнитной силы F , а затем в аналитической обработке полученной характеристики для вычисления текущих значений гради-

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ СТАБИЛЬНОСТИ

ента $\text{grad}B$ и, как следствие, магнитного силового фактора $B\text{grad}B$. Целесообразность применения именно такой формы наконечников обусловлена отсутствием сложностей для выполнения условия достижения стабильной неоднородности поля в определенной зоне (именуемой рабочей, исполнительной, для выполнения в ней необходимых исследований).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Хотя описанный выше подход достаточно обоснован и проработан, он все же не дает прямых данных об изменении магнитной силы F , характере ее изменения и тем самым прямых указаний на дислокацию исполнительной зоны между полюсными наконечниками, одновременно обладая заниженной оперативностью и повышенной трудоемкостью. Поэтому целью данного исследования было обнаружение исполнительной зоны, где магнитная сила относительно постоянна, посредством прямых измерений этой силы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Проводилась серия экспериментов по изучению изменения магнитной силы F , создаваемой в магнитометре пондеромоторного и/или магнитнореологического типа, при удалении от межцентрового расстояния полюсных наконечников в направлении $\bar{x}$ (рис. 1) по линии действия силы F . При этом отличительной особенностью данного метода является применение вместо измерительного средства с датчиком Холла (позволяющего учесть изменение величины индукции B) измерительного средства с датчиком-феррозондом I в виде шара, изготовленного, например, из стали марки ШХ15, в качестве объекта, на который воздействует поле между полюсными наконечниками 2 (диаметром D).

Как и в случае с применением экспериментально-аналитического метода диагностики, исследование проводилось при соблюдении следующих условий:

- строгое расположение датчика-феррозонда в плоскости симметрии полюсов-полусфер (рис. 1);
- перемещение с определенным мелким шагом (например, 1 мм);
- проведение измерений с учетом варьирования намагничивающей силы $I\omega$ установки (I — сила тока в обмотке с числом витков ω) и расстояния b между полюсами-полусферами.

Контроль магнитной силы F , действующей на датчик-феррозонд, производился на примере шаров диаметрами $d = 4, 5.16$ и 6 мм с пошаго-

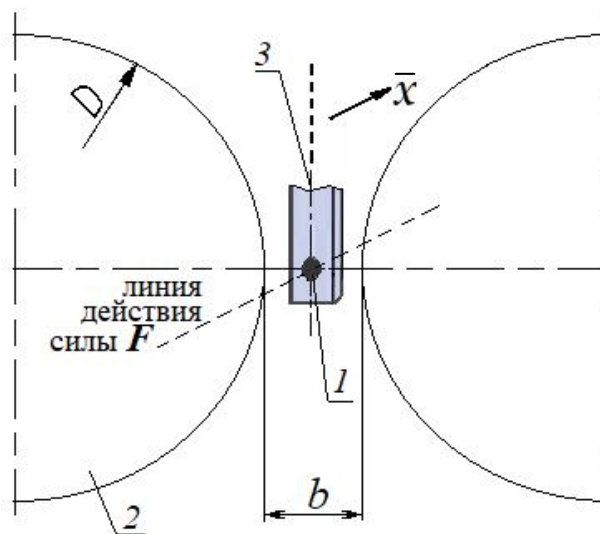


Рис. 1. Схема проведения опыта по идентификации рабочей зоны (стабильности магнитной силы) в магнитометре.

1 — датчик-феррозонд измерительного средства; 2 — намагничиваемые полюса-полусферы диаметром D при их взаимном удалении на расстояние b ; 3 — система контроля магнитной силы F

вым их смещением между полюсами-полусферами диаметром $D = 184$ мм.

Проведены четыре серии экспериментов при разном расстоянии b между полюсами-полусферами (серия 1 — $b = 19.5$ мм; серия 2 — $b = 21$ мм; серия 3 — $b = 24$ мм; серия 4 — $b = 28$ мм). При выполнении каждой серии экспериментов намагничивающую силу $I\omega$ обмотки устанавливали (поочередно): 6000, 9000, 12 000, 15 000 А. Полученные результаты отображены в Приложении на рис. П1–П4 (перемещение феррозонда осуществлялось с шагом 1 мм).

Как показывают эксперименты (рис. П1–П4, верхние графики), по мере удаления x датчика-феррозонда каждая из получаемых зависимостей F от x сначала возрастает, а затем убывает, демонстрируя тем самым экстремальный характер — с координатой экстремума (максимума) x_{extr} . Зона в окрестности экстремума зависимости F от x , где значения F практически постоянны, представляет собой искомую исполнительную зону магнитометра — ту зону, в которой целесообразно проводить в дальнейшем исследование магнитной восприимчивости объектов малого объема.

С ростом расстояния b между полюсными наконечниками, т.е. их взаимного удаления друг от друга, координата экстремума x_{extr} несколько смещается вправо. Так, если при установленном

расстоянии $b = 19.5$ мм экстремум приходился на $x_{extr} = 18...19$ мм, то при $b = 28$ мм координата максимума составляет уже $x_{extr} = 23...24$ мм. Данный факт зависимости x_{extr} от b был отмечен также и в ранее проведенных исследованиях [14].

Проведенный анализ зависимостей F от x (Приложение, рис. П1–П4) позволил выявить еще одно очень важное, отмечавшееся ранее [12], обстоятельство. Так, при применении одного и того же датчика-феррозонда на определенном расстоянии b между полюсами-полусферами, но с изменением намагничивающей силы $I\omega$ в 2.5 раза (с 6000 до 15 000 А) значение экстремума неизменно. Это хорошо видно на рис. П1–П4 (на графиках $F/F_{max}(x)$), где в качестве ординаты теперь выступает параметр относительной магнитной силы F/F_{max} , получаемый как отношение текущего значения силы F к ее максимальной величине F_{max} (в рамках определенного установленного в магнитометре значения $I\omega$). В таких координатах становится очевидным полное согласие зависимостей F от x вне связи с намагничивающей силой $I\omega$ (естественно, в рамках фактически используемого диаметра датчика при каждой серии опытов при том или ином расстоянии b).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены серии экспериментов по апробации нового метода идентификации рабочей (исполнительной) зоны в магнитометрах пондеромоторного и/или магнитно-реологического типов, в которой необходимо выполнять исследования по контролю магнитной восприимчивости χ объектов малых размеров (в том числе частиц). Преимуществом данного метода является возможность проведения прямых измерений магнитной силы F , по относительному постоянству которой в окрестности своего максимума (на определенном участке — по мере удаления x от межцентрового расстояния

полюсных наконечников) можно судить о наличии искомой исполнительной зоны.

По итогу проведенных четырех серий экспериментов (при различном расстоянии $b = 19.5$ –28 мм между полюсными наконечниками диаметром $D = 184$ мм), в каждой из которых применялись феррозонды трех диаметров ($d = 4, 5.16$ и 6 мм), воспринимающие действие магнитной силы при четырех величинах намагничивающей силы $I\omega$ обмотки магнитометра (6000, 9000, 12 000, 15 000 А), получены следующие результаты.

Во-первых, характер зависимостей магнитной силы F от расстояния x — экстремальный, позволяет сразу по итогу диагностики, т.е. без дополнительной аналитической обработки зависимостей, определять максимальное значение искомой величины и тем самым зону ее относительно стабильного значения. При этом такой вид полученных графиков свойственен для всех характеристик (48 в рамках данного исследования).

Во-вторых, отмечена особенность, характерная и для ранее апробированного метода-аналога по диагностике рабочей зоны, а именно некоторое незначительное смещение координаты экстремума x_{extr} с ростом расстояния b между полюсными наконечниками, т.е. их взаимного удаления друг от друга.

В-третьих, доказано, что в случае позиционирования датчика-феррозонда определенного диаметра d при определенном расстоянии b между наконечниками координата экстремума сохраняется неизменной — независимой от намагничивающей силы $I\omega$ обмотки магнитометра. Этот факт имеет практическую значимость для исследователя, позволяя упростить процесс определения рабочей (исполнительной) зоны, когда достаточно получить всего лишь одну характеристику распределения F от x при приемлемом значении $I\omega$.

ПРИЛОЖЕНИЕ

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ СТАБИЛЬНОСТИ

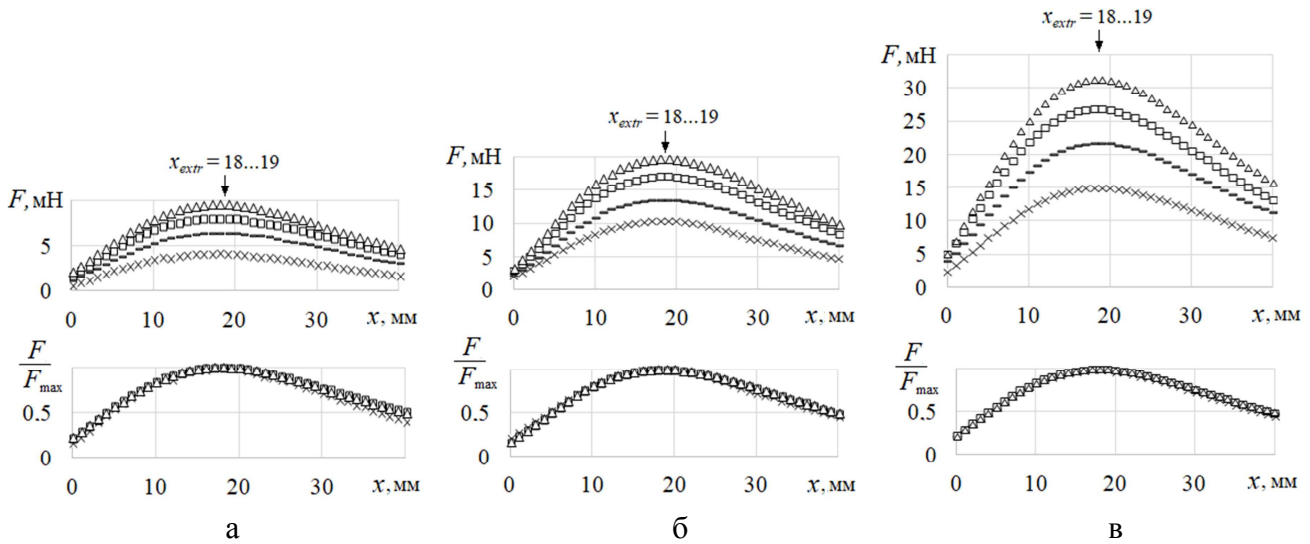


Рис. П1. Координатные зависимости магнитной силы F (верхние графики), действующей на датчики-феррозонды различного диаметра d , и относительной магнитной силы $F/F_{\max}$ (нижние графики) при различной намагничивающей силе $I\omega$.

$\times$ — $I\omega = 6000$ А; — $I\omega = 9000$ А; $\square$ — $I\omega = 12000$ А; Δ — $I\omega = 15000$ А;

а — $d = 4$ мм, б — $d = 5.16$ мм, в — $d = 6$ мм; расстояние между полюсными наконечниками-полусферами $b = 19.5$ мм

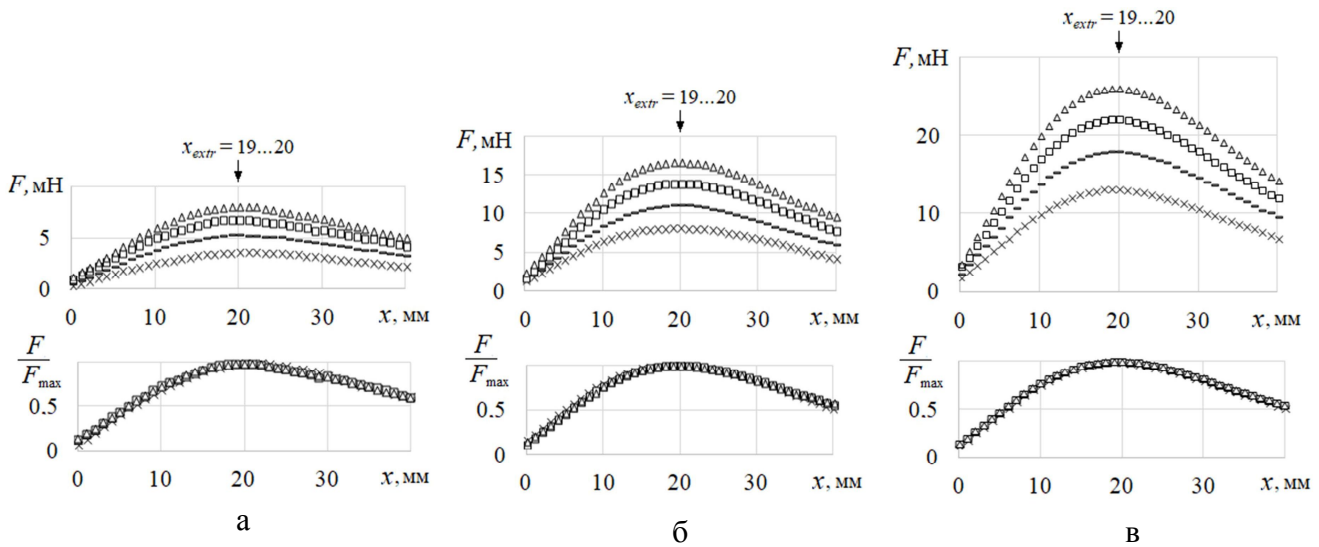
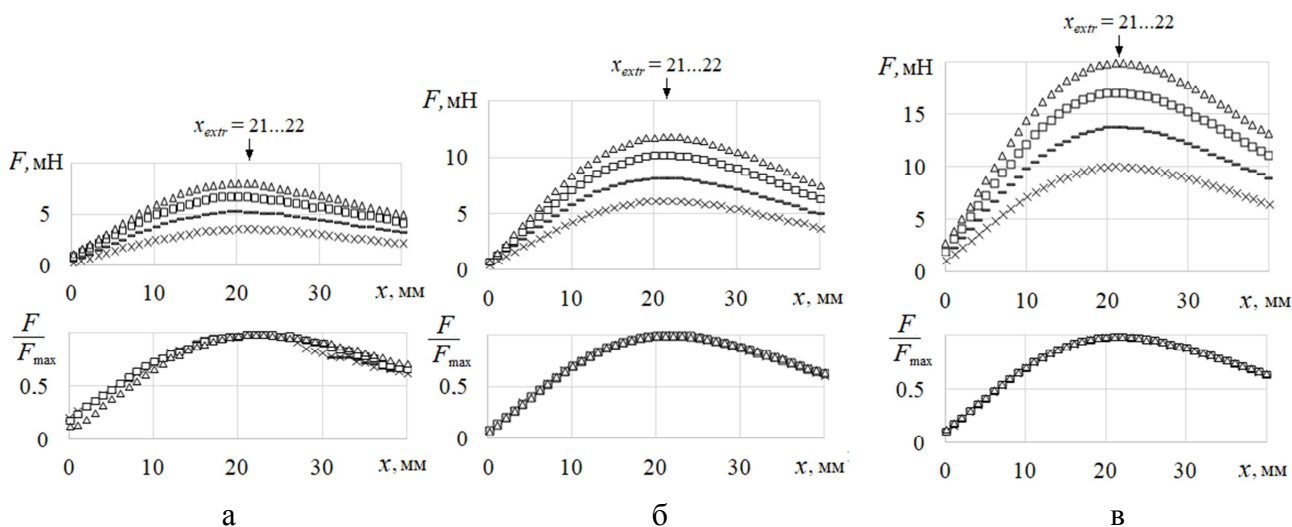
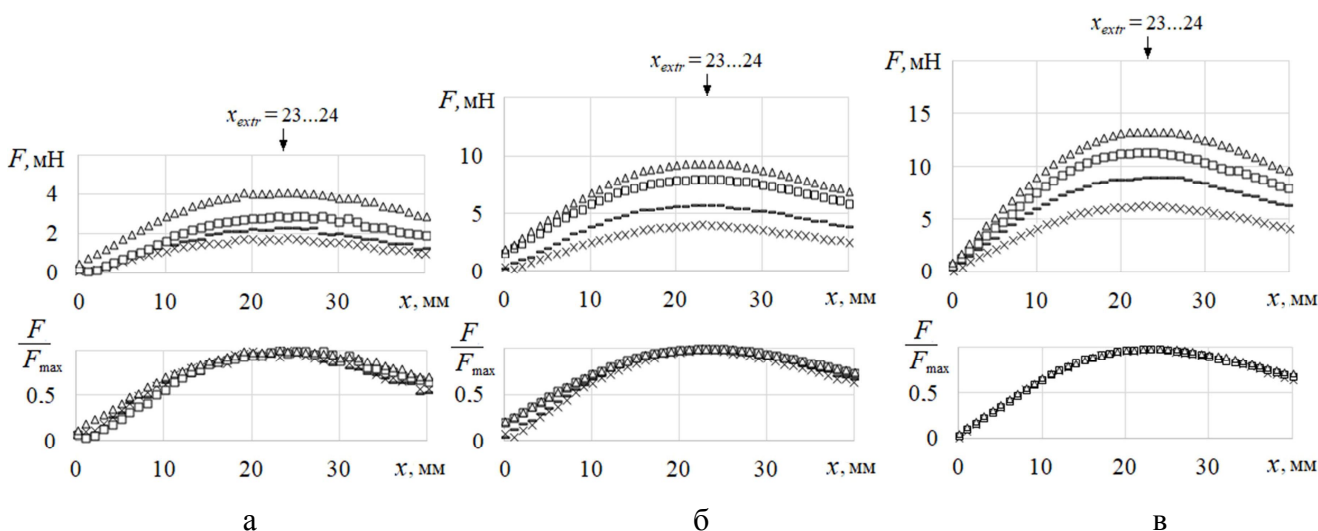


Рис. П2. То же, как на рис. П1, но при $b = 21$ мм.

Рис. П3. То же, как на рис. П1, но при $b = 24$ мм.Рис. П4. То же, как на рис. П1, но при $b = 28$ мм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания в сфере науки (проект FSFZ-2024-0005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Riminucci A., Uhlarz M., De Santis R., Herrmannsdörfer T. Analytical balance-based Faraday magnetometer // *Journal of Applied Physics*. 2017. Vol. 121, iss. 9. Id. 094701. DOI: 10.1063/1.4977844
2. Piepgras R., Michlmayr S., Espina-Hernández J.H., Zagar B. Sources of error in a Faraday magnetometer for magnetic microstructure analysis // *Journal of Physics: Conf. Series*. 2018. Vol. 1065, iss. 3. Id. 032004. DOI:10.1088/1742-6596/1065/3/032004
3. 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. No. 2 (1). P. 32–36. DOI: 10.5923/j.materials.20120201.06
4. Mexner W., Heinemann K. An improved method for relaxation measurements using a Faraday balance // *Review of Scientific Instruments*. 1993. Vol. 64, no. 11. P. 3336–3337. DOI: 10.1063/1.1144303

5. Zhang Z., Hou R., Gong W., He J., Lin A. Faraday balance for measuring temperature coefficient of magnetic moment of permanent magnet // 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018). Paris. 2018. P. 1–2. DOI:10.1109/CPEM.2018.8501039
6. Hosu B.G., Jakab K., Bánki P., Tóth F.I., Forgacs G. Magnetic tweezers for intracellular applications // Review of Scientific Instruments. 2003. Vol. 74, no. 9. P. 4158–4163. DOI: 10.1063/1.1599066
7. Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Ершова В.А., Сандуляк Д.А. Способ магнитно-реологического контроля магнитной восприимчивости частицы. Патент № RU 753159C1 от 12.08.2021г. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2753159C1/ru>
8. Сандуляк Д.А. Варианты магнитно-реологического метода контроля магнитной восприимчивости одиночной частицы // Известия вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 7. С. 599–608. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-599-608
9. Казин П.Е., Кульбакин И.В. Методы исследования магнитных свойств материалов. М.: МГУ, 2011. 34 с.
10. Cape J.A., Young R.A. Canted Helmholtz coils for constant-gradient Faraday balance magnetometry // Review of Scientific Instruments. 1971. Vol. 42, no. 7. P. 1061–1063. DOI: 10.1063/1.1685279
11. Marcon P., Ostanina K. Overview of methods for magnetic susceptibility measurement // PIERS Proceedings, Malaysia, Kuala Lumpur. March 27–30, 2012. P. 420–424. URL: <https://www.proceedings.com/17890.html>
12. Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Полисмакова М.Н., Сандуляк Д.А., Киселев Д.О. Устройство для создания и диагностики зоны стабильной неоднородности магнитного поля. Патент № RU 2737609C1 от 1.12.2020. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2737609C1_20201201
13. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Polismakova M.N., Kiselev D.O., Ershova V.A., Sandulyak D.A. The Use of Spherical Pole Pieces For Performing the Faraday Balance Method // Instruments and Experimental Techniques. 2018. Vol. 61, no. 1. P. 123–126. DOI: 10.1134/S0020441218010293
14. 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. DOI: 10.32362/2500-316X-2017-5-2-57-69

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

Контакты: Сандуляк Дарья Александровна,
d.sandulyak@mail.ru

Материал поступил в редакцию 25.10.2024

METHOD FOR IDENTIFICATION OF WORKING ZONE OF MAGNETIC FORCE STABILITY IN PARTICLE SUSCEPTIBILITY CONTROL MAGNETOMETER

**D. A. Sandulyak, A. S. Kharin, A. A. Sandulyak, M. N. Polismakova,
A. V. Sandulyak, D. A. Golovchenko, A. D. Kosenkov**

MIREA – Russian technological university, Moscow. Russia

In order to ensure correct conditions when monitoring the magnetic susceptibility of particles in magnetometers of ponderomotive and/or magnetic rheological types, the step of identification the working (executive) zone for such monitoring is especially important. In this regard, a new method has been proposed for identifying this zone, a distinctive feature of which is the use (for diagnosing the field between the pole pieces) of a spherical ferrosensor that perceives the effect of magnetic force F at a distance x from the center distance of the pole pieces in a certain (along the line of action of magnetic force) direction. A series of experiments were carried out with varying the diameter d of the sensor and the magnetizing force $I\omega$ the magnetometer.

Keywords: magnetometers for control magnetic susceptibility, method of identification the working zone, stability of magnetic force, spherical ferrosensor

REFERENCES

1. Riminucci A., Uhlarz M., De Santis R., Herrmannsdörfer T. Analytical balance-based Faraday magnetometer. *Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 121, iss. 9, Id. 094701. DOI: 10.1063/1.4977844
2. Piepgras R., Michlmayr S., Espina-Hernández J.H., Zagar B. Sources of error in a Faraday magnetometer for magnetic microstructure analysis. *Journal of Physics: Conf. Series*, 2018, vol. 1065, iss. 3, Id. 032004. DOI:10.1088/1742-6596/1065/3/032004
3. 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, vol. 2, iss. 1, pp. 32–36. DOI: 10.5923/j.materials.20120201.06
4. Mexner W., Heinemann K. An improved method for relaxation measurements using a Faraday balance. *Review of Scientific Instruments*, 1993, vol. 64, iss. 11, pp. 3336–3337. DOI: 10.1063/1.1144303
5. Zhang Z., Hou R., Gong W., He J., Lin A. Faraday balance for measuring temperature coefficient of magnetic moment of permanent magnet. *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, Paris, 2018, pp. 1–2. DOI:10.1109/CPEM.2018.8501039
6. Hosu B.G., Jakab K., Bánki P., Tóth F.I., Forgacs G. Magnetic tweezers for intracellular applications. *Review of Scientific Instruments*, 2003, vol. 74, iss. 9, pp. 4158–4163. DOI: 10.1063/1.1599066
7. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Ershova V.A., Sandulyak D.A. *Sposob magnitno-reologicheskogo kontrolya magnitnoi vospriimchivosti chastitsy*. Patent RF no. RU 753159C1 [Patent for method for magnetic-rheological control of magnetic susceptibility of particle]. Prioritet 12.08.2021. (In Russ.). URL: <https://patents.google.com/patent/RU2753159C1/ru>
8. Sandulyak D.A. [Variants of magnetic-rheological method for monitoring the magnetic susceptibility of a single particle]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2024, vol. 67, iss. 7, pp. 599–608. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-599-608 (In Russ.).
9. Kazin P.E., Kul'bakin I.V. *Metody issledovaniya magnitnykh svoystv materialov* [Methods of research of magnetic properties of materials]. Moscow, MSU Publ., 2011. 34 p. (In Russ.).
10. Cape J.A., Young R.A. Canted Helmholtz coils for constant-gradient Faraday balance magnetometry. *Review of Scientific Instruments*, 1971, vol. 42, no. 7, pp. 1061–1063. DOI: 10.1063/1.1685279
11. Marcon P., Ostanina K. Overview of methods for magnetic susceptibility measurement. *PIERS Proceedings, Malaysia, Kuala Lumpur*, March 27–30, 2012, pp. 420–424. URL: <https://www.proceedings.com/17890.html>
12. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Kiselev D.O. *Ustroistvo dlya sozdaniya i diagnostiki zony stabil'noi neodnorodnosti magnitnogo polya*. Patent RF no. RU 2737609C1 [Patent for device for creation and diagnostics of stable magnetic field non-uniformity zone]. Prioritet 1.12.2020. (In Russ.). URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2737609C1_20201201
13. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Polismakova M.N., Kiselev D.O., Ershova V.A., Sandulyak D.A. The Use of Spherical Pole Pieces For Performing the Faraday Balance Method. *Instruments and Experimental Techniques*, 2018, vol. 61, no. 1, pp. 123–126. DOI: 10.1134/S0020441218010293
14. 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]. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* [Russian Technological Journal], 2017, vol. 5, iss. 2, pp. 57–69. DOI: 10.32362/2500-316X-2017-5-2-57-69 (In Russ.).

Contacts: Sandulyak Darya Alexandrovna,
d.sandulyak@mail.ru

Article received by the editorial office on 25.10.2024

INTRODUCTION

To solve the urgent problem of determining the magnetic susceptibility χ of small-volume objects (particles) as a fine diagnostics problem, the ponderomotive method (alternative name — Faraday balance) is considered the most acceptable [1–6]. The magnetorheological method [7, 8] (partially based on the ponderomotive principle) is also being developed. Both of these methods are effectively implemented in a measuring system — a magnetometer with magnetizable spherical pole pieces.

The methodology of this type of experiment for finding the value of χ of the object under study is based on the expression for the ponderomotive (magnetic) force F :

$$F = \mu_0 \cdot \chi \cdot V \cdot H \cdot \text{grad} H,$$

or

$$F = \frac{\chi \cdot V \cdot B \cdot \text{grad} B}{\mu_0},$$

acting on this object located between the pole pieces, where χ and V are its magnetic susceptibility and volume, H and B are the magnetic field strength and induction, $H \cdot \text{grad} H$, or $B \cdot \text{grad} B$, is the magnetic force factor, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m is the absolute magnetic permeability of vacuum.

In this regard, the stage of diagnostics of the field between the pole pieces is of particular interest. The diagnostics include the mandatory identification of a strictly defined working (performing) zone between the pole pieces for performing research, a zone that should be characterized by relatively stable (along the set direction) values of the magnetic force factor $H \cdot \text{grad} H$, or $B \cdot \text{grad} B$. It is worth noting that this stage of diagnostics for a long time remained without a substantiated methodology for its implementation and required significant study. This situation was partly explained by the difficulty of achieving the specified stable field inhomogeneity and the ongoing discussion about which of the magnetic field characteristics is preferable — $\text{grad} H$ ($\text{grad} B$) or $H \cdot \text{grad} H$ ($B \cdot \text{grad} B$) [6, 9–11].

Subsequently, in the works [12, 13], an experimental-analytical method of such diagnostics using spherical pole pieces was proposed. It consists in the experimental step-by-step determination of the magnetic induction B (or the strength H) along a given direction $\bar{x}$ between the pieces, i.e., along the line of action of the magnetic force F , and then in the analytical processing of the obtained characteristic to calculate the current values of the gradient $\text{grad} B$ and, as a consequence, the magnetic force factor $B \cdot \text{grad} B$. The expediency of using this particular form of tips is due to the absence of difficulties in fulfilling the condition of

achieving stable heterogeneity of the field in a certain zone (called working, executive, for performing the necessary research in it).

PROBLEM STATEMENT

Although the approach described above is sufficiently substantiated and developed, it still does not provide direct data on the change in magnetic force F , the nature of its change, and thus direct indications of the location of the performing zone between the pole pieces, but it has reduced efficiency and increased labor intensity. Therefore, the purpose of this study was to detect the performing zone, where the magnetic force is relatively constant, by means of direct measurements of this force.

RESULTS OF THE STUDY AND THEIR ANALYSIS

A series of experiments were conducted to study the change in the magnetic force F created in a ponderomotive and/or magnetorheological type magnetometer as pole pieces are moved from the intercenter distance in the direction $\bar{x}$ (Fig. 1) along the line of action of the force F . A distinctive feature of this method is the use of a measuring device with a ferroprobe sensor I instead of a measuring device with a Hall sensor (which allows considering the change in the magnitude of induction B). The sensor I has the form of a ball made, for example, of grade IIIХ15 steel, and is an object affected by the field between the pole pieces 2 (diameter D).

Fig. 1. Scheme of the experiment on the identification of the working zone (stability of magnetic force) in the magnetometer.
1 — ferroprobe sensor of the measuring device; 2 — magnetized poles-hemispheres with a diameter D at their mutual removal at a distance b ; 3 — system of control of magnetic force F

As in the case of using the experimental-analytical diagnostic method, the study was carried out under the following conditions:

- placement of the ferroprobe sensor strictly in the plane of symmetry of the poles-hemispheres (Fig. 1);
- movement with a certain small step (for example, 1 mm);
- measurements involving the variation of the magnetizing force $I\omega$ of the installation (I is the current strength in the winding with the number of turns ω) and the distance b between the poles-hemispheres.

The control of the magnetic force F acting on the ferroprobe sensor was carried out using the example of balls with diameters $d = 4$ mm, $d = 5.16$ mm and

$d = 6$ mm with their step-by-step displacement between the poles-hemispheres with a diameter $D = 184$ mm.

Four series of experiments were carried out at different distances b between the poles-hemispheres (series 1 — $b = 19.5$ mm; series 2 — $b = 21$ mm; series 3 — $b = 24$ mm; series 4 — $b = 28$ mm). During each series of experiments, the magnetizing force $I\omega$ of the winding was set (in turn): 6000, 9000, 12 000, 15 000 A. The results obtained are shown in the Appendix in Figs. П1–П4 (the ferroprobe was moved in 1 mm increments).

As the experiments show (Figs. П1–П4, upper graphs), as the ferroprobe is moved from the sensor, each of the obtained dependences of F on x first increases and then decreases, thereby demonstrating an extreme character with the coordinate of the extremum (maximum) x_{extr} . The zone in the vicinity of the extremum of the dependence of F on x , where the values of F are practically constant, represents the desired performing zone of the magnetometer — the zone in which it is advisable to conduct further studies of the magnetic susceptibility of small-volume objects.

With increasing distance b between the pole pieces, the coordinate of the extremum x_{extr} shifts slightly to the right. Thus, if at a set distance $b = 19.5$ mm the extremum falls on $x_{extr} = 18...19$ mm, then at $b = 28$ mm the coordinate of the maximum is $x_{extr} = 23...24$ mm. This fact of the dependence of x_{extr} on b was also observed in earlier research [14].

The conducted analysis of the dependences of F on x (Appendix, Figs. П1–П4) made it possible to reveal another very important circumstance, noted earlier [12]. When using the same ferroprobe sensor at a certain distance b between the pole hemispheres but changing the magnetizing force $I\omega$ by 2.5 times (from 6000 A to 15 000 A), the value of the extremum stays unchanged. This is clearly seen in Figs. П1–П4 (on the $F/F_{max}(x)$ graphs), where the relative magnetic force parameter F/F_{max} now acts as the ordinate, obtained as the ratio of the current value of the force F to its maximum value F_{max} (within a certain value $I\omega$ set in the magnetometer). In such coordinates, complete agreement between the F dependences on x becomes obvious, regardless of the magnetizing force $I\omega$ (naturally, within the actually used sensor diameter in each series of experiments at a given distance b).

CONCLUSION

A series of experiments were conducted to test a new method for identifying the working (executive) zone in ponderomotive and/or magnetorheological magnetometers — zone, in which it is necessary to carry out studies to control the magnetic susceptibility χ of small-sized objects (including particles). The ad-

vantage of this method is the possibility of direct measurements of the magnetic force F , which relative constancy in the vicinity of its maximum (in a certain section - as x moves away from the center-to-center distance of the pole pieces) determines the presence of the desired performing zone.

The following results were obtained as a result of four series of experiments (at various distances $b = 19.5...28$ mm between pole pieces with a diameter of $D = 184$ mm), each using the ferroprobes of three diameters ($d = 4$ mm, $d = 5.16$ mm and $d = 6$ mm), perceiving the effect of the magnetic force (at four values of the magnetizing force $I\omega$ of the magnetometer winding: 6000 A, 9000 A, 12 000 A, 15 000 A).

Firstly, the nature of the dependences of the magnetic force F on the distance x is extreme, which allows one to determine the maximum value of the desired quantity and, thus, the zone of its relatively stable value immediately after the diagnostics, i.e., without additional analytical processing of the dependences. Moreover, this type of graphs obtained is typical for all characteristics (48 within the framework of this study).

Secondly, a feature is noted that is also characteristic of the previously tested analog method for diagnosing the working zone, namely, some insignificant shift in the coordinate of the extremum x_{extr} with an increase in the distance b between the pole tips, i.e., their mutual distance from each other.

Thirdly, it is proven that in the case of positioning the ferroprobe sensor of a certain diameter d at a certain distance b between the tips, the coordinate of the extremum remains unchanged — independent of the magnetizing force $I\omega$ of the magnetometer winding. This fact has practical significance for the researcher, allowing one to simplify the process of determining the working (executive) zone when it is sufficient to obtain only one characteristic of the distribution F from x with an acceptable value of $I\omega$.

APPENDIX

Fig. П1. Coordinate dependences of the magnetic force F (upper graphs) acting on the ferroprobe sensors of various diameters d , and the relative magnetic force F/F_{max} (lower graphs) at different magnetizing forces $I\omega$.

× — $I\omega = 6000$ A; — — $I\omega = 9000$ A; □ — $I\omega = 12\ 000$ A; Δ — $I\omega = 15\ 000$ A;
a — $d = 4$ mm, б — $d = 5.16$ mm, в — $d = 6$ mm; the distance between the pole pieces-hemispheres $b = 19.5$ mm

Fig. II2. Same as in Fig. 2, but with $b = 21$ mm

Fig. II3. Same as in Fig. 2, but with $b = 24$ mm

Fig. II4. Same as in Fig. 2, but with $b = 28$ mm