

Сандуляк Анна Александровна

д-р техн. наук, профессор

Киселев Дмитрий Олегович

аспирант

Полисмакова Мария Николаевна

канд. техн. наук, доцент

Сандуляк Александр Васильевич

д-р техн. наук, профессор

Сандуляк Дарья Александровна

канд. техн. наук, инженер

ФГБОУ ВО «Московский технологический университет»

г. Москва

DOI 10.21661/r-464725

**О ВЗАИМНОМ СОГЛАСИИ КООРДИНАТ МЕЖПОЛЮСНЫХ ЗОН
СТАБИЛЬНОСТИ ГРАДИЕНТА И СИЛОВОГО ФАКТОРА
ДЛЯ НАКОНЕЧНИКОВ-ПОЛУСФЕР РАЗНОГО ДИАМЕТРА**

***Аннотация:** авторами изучено влияние расстояния между предлагаемыми к использованию (в магнетометре Фарадея) полюсными наконечниками-полусферами на значения координат экстремумов градиента и силового фактора, а также на экстремальные значения этих параметров. Установлены соответствующие зависимости – близкие к логарифмической и степенной. Показана возможность оперирования более универсальными относительными (отнесенными к диаметру или радиусу) значениями расстояния между полюсными наконечниками и соответственно координаты экстремума градиента или силового фактора.*

***Ключевые слова:** полюсные наконечники-полусферы, градиент, силовой фактор, зоны стабильности.*

При решении многих научно-практических задач, связанных с получением информации о магнитной восприимчивости образцов материалов, весьма востребованным продолжает оставаться метод Фарадея. Соответствующие магнетометры условно можно классифицировать по трем типам. Первый – на основе использования электромагнитной системы (блока, состоящего из обмоток намагничивания, сердечников и полюсных наконечников) [1–5], второй – на основе коротких (в том числе сверхпроводящих) катушек [6–8], третий – на основе постоянных высокоэнергетичных магнитов (например, Nd-Fe-B) [9; 10].

В [11–13] обосновано оригинальное решение о целесообразности использования в магнетометрах первого типа (самых многочисленных) полюсных наконечников-полусфер. Оно аргументировано тем, что в этом случае в радиальном направлении плоскости симметрии межполюсной области специально получаемая координатная характеристика индукции B является извилистой. Тем самым это гарантирует (математически) получение экстремальной координатной характеристики градиента индукции (практически тождественного здесь производной dB/dx), в окрестности же координаты экстремума x_{extr} значения dB/dx почти стабильны. Экстремальной является и координатная характеристика величины BdB/dx , названной в [14] магнитным силовым фактором – с индивидуальной координатой экстремума x_{extr} , в окрестности которого значения BdB/dx почти стабильны.

В [11–13] на примере наконечников-полусфер диаметром $D=100$ мм получены координаты x_{extr} . В этом частном случае они оказались не зависимыми от токовой нагрузки I и зависимыми от взаимного удаления наконечников-полусфер b . Важным представляется развитие этих исследований с применением наконечников-полусфер иного диаметра, что дало бы возможность сопоставить соответствующие координаты зон стабильности как градиента, так и силового фактора. Это необходимо, главным образом, для выяснения правомочности оперирования относительными (как более универсальными) параметрами: b/D и x_{extr}/D .

На рис.1 показаны координатные зависимости индукции поля B в области между полюсными наконечниками-полусферами диаметром $D = 135$ мм – при их различных взаимных удалениях b – от 4,7 мм до 17,6 мм и различных значениях тока питания обмотки I – от 4 А до 30 А. Видно, что каждая из кривых B имеет перегиб (в окрестности которого, как и прежде [11–13] ее участок может быть линеаризован), что свидетельствует о наличии экстремума координатной характеристики градиента dB/dx (рис. 2), определяемой, как и в [11–13], посредством полинома четвертой степени, с получением соответствующих значений координат экстремума x_{extr} (табл. 1).

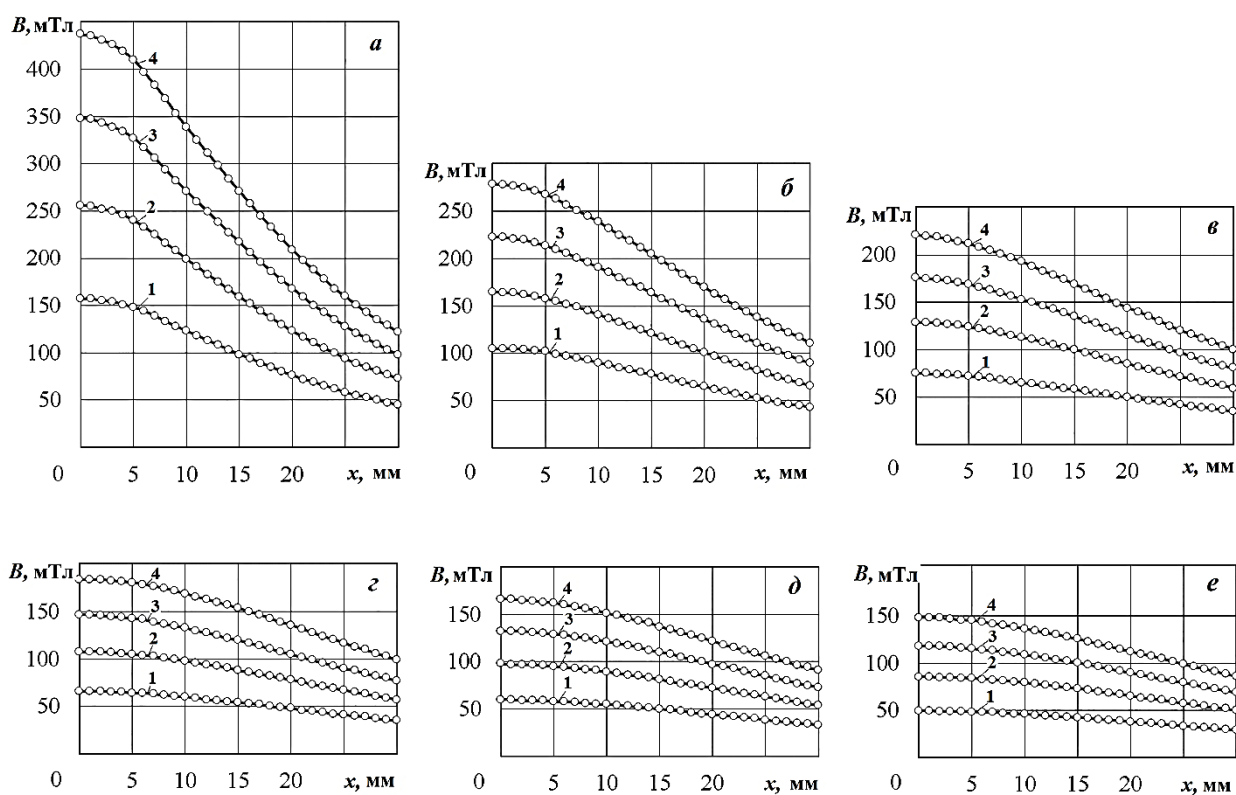


Рис. 1. Координатные характеристики индукции поля между полюсными наконечниками-полусферами, точки – эксперимент, линии – расчет с использованием полинома; а) $b = 4,7$ мм, б) $b = 8,1$ мм, в) $b = 10,8$ мм, г) $b = 13,5$ мм, д) $b = 15,5$ мм, е) $b = 17,6$ мм;
1 – $I = 4$ А, 2 – $I = 8$ А, 3 – $I = 16$ А, 4 – $I = 30$ А

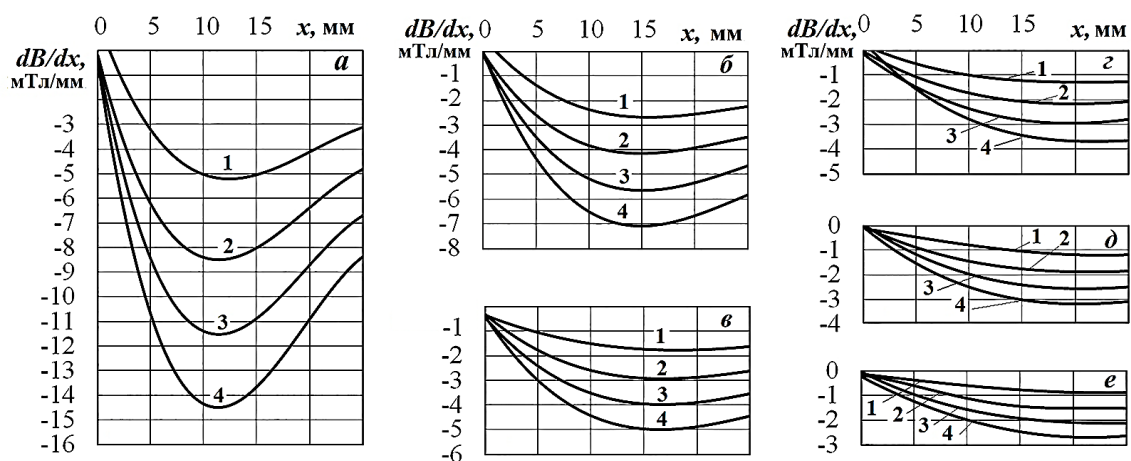


Рис. 2. Координатные характеристики градиента,
полученные на основании данных рис. 1

Таблица 1

Координаты экстремумов зависимостей, показанных на рис. 2.

| I, A | $x_{extr} (мм)$ при различных значениях $b (мм)$ | | | | | |
|--------|--|-----------|------------|------------|------------|------------|
| | $b = 4,7$ | $b = 8,1$ | $b = 10,8$ | $b = 13,5$ | $b = 15,5$ | $b = 17,6$ |
| 4 | 11,43 | 14,62 | 18,23 | 19,86 | 21,57 | 22,94 |
| 8 | 11,42 | 14,89 | 16,73 | 19,80 | 21,28 | 19,62 |
| 16 | 11,43 | 15,07 | 16,71 | 19,55 | 20,72 | 24,93 |
| 30 | 11,37 | 14,94 | 16,52 | 21,74 | 20,38 | 21,60 |
| | 11,41 | 14,88 | 17,05 | 20,24 | 20,99 | 22,27 |

Как и в [11–13], здесь также наблюдается индивидуальный экстремум той или иной координатной характеристики магнитного силового фактора BdB/dx (рис. 3) – с соответствующими значениями координат экстремума x_{extr} (табл. 2).

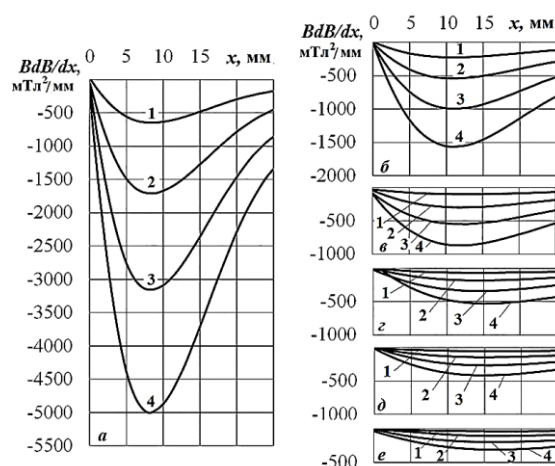


Рис. 3. Координатные характеристики магнитного силового фактора,
полученные на основании данных рис. 1 и рис. 2

Таблица 2

Координаты экстремумов зависимостей, показанных на рис. 3

| I, A | $x_{extr} (мм)$ при различных значениях $b (мм)$ | | | | | |
|--------|--|-----------|------------|------------|------------|------------|
| | $b = 4,7$ | $b = 8,1$ | $b = 10,8$ | $b = 13,5$ | $b = 15,5$ | $b = 17,6$ |
| 4 | 8,559 | 11,05 | 12,77 | 14,00 | 16,91 | 18,17 |
| 8 | 8,458 | 11,01 | 12,18 | 14,57 | 15,42 | 16,15 |
| 16 | 8,458 | 11,16 | 12,11 | 14,56 | 15,38 | 16,37 |
| 30 | 8,391 | 11,10 | 12,07 | 15,43 | 15,07 | 16,63 |
| | 8,466 | 11,08 | 12,28 | 14,64 | 15,69 | 16,83 |

Следует отметить, что аналогично [11–13] (где $D = 100$ мм), для полюсных наконечников-полусфер диаметром $D = 135$ мм также характерным является то, что координата экстремума x_{extr} как градиента, так и силового фактора не зависит от токовой нагрузки обмотки (рис. 1–3, табл. 1, 2).

Что же касается влияния на x_{extr} взаимного удаления b наконечников-полусфер, то при заметно больших (чем для $D = 100$ мм [11–13]) значениях x_{extr} (рис. 4, 5) примечательным является то, что получаемые данные в относительных координатах, а именно x_{extr}/D от b/D , обобщаются – как для характеристики градиента (рис. 6), так и силового фактора (рис. 7). Это свидетельствует об универсальности подхода к идентификации зон стабильности (градиента и силового фактора) между полюсными наконечниками именно такой (сферической) формы независимо от их диаметра.

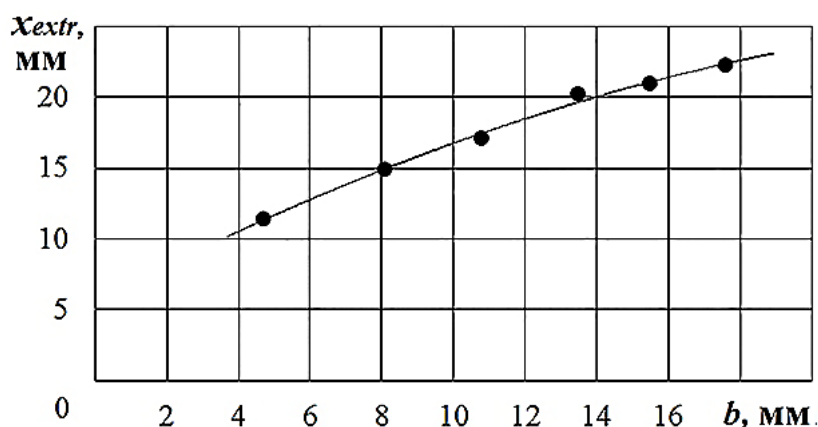


Рис. 4. Влияние взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер ($D = 135$ мм) на координату экстремума градиента индукции (условного центра зоны его стабильности)

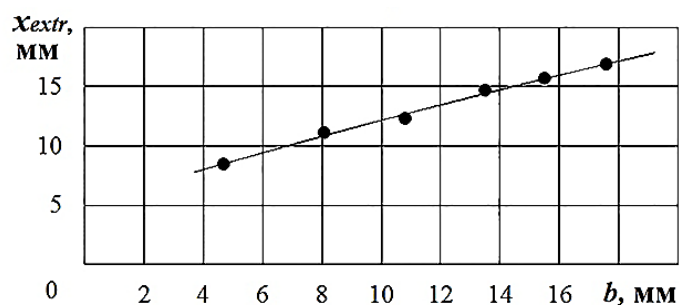


Рис. 5. Влияние взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер ($D = 135 \text{ мм}$) на координату экстремума магнитного силового фактора (условного центра зоны его стабильности)

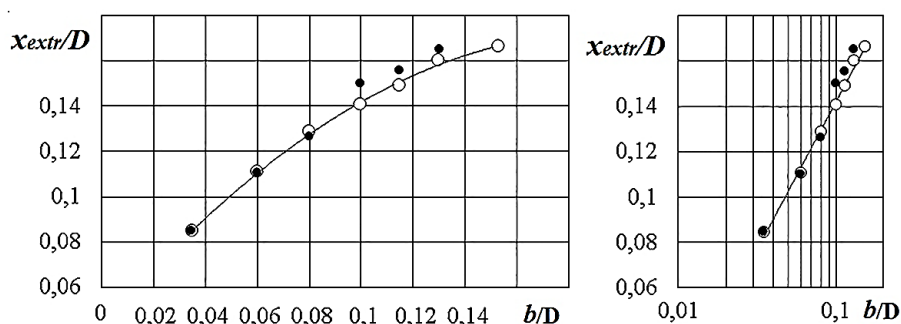


Рис. 6. Влияние относительных значений взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер на относительную координату экстремума градиента индукции, \circ – $D=100 \text{ мм}$ (данные [11–13]), \bullet – $D=135 \text{ мм}$ (по данным рис.4); в полулогарифмических координатах данные квазилинеаризуются, что указывает на их логарифмический вид

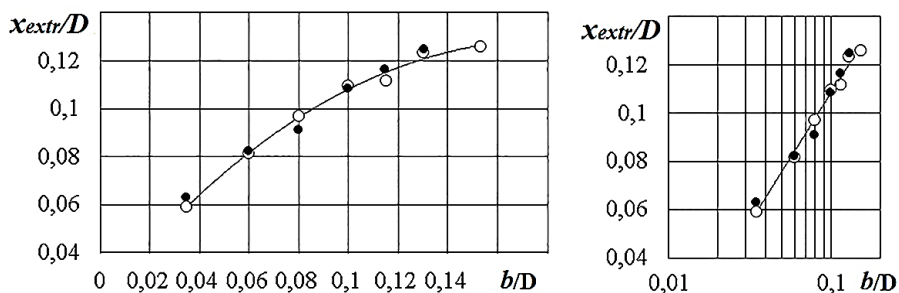


Рис. 7. Влияние относительных значений взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер на относительную координату экстремума магнитного силового фактора; \circ – $D=100 \text{ мм}$ (данные [11–13]), \bullet – $D=135 \text{ мм}$ (по данным рис. 5); в полулогарифмических координатах данные квазилинеаризуются, что указывает на их логарифмический вид

Разумеется, сказанное в полной мере касается и размеров самих зон (интервалов x), т.е. Δx (рис.1–3) – в более универсальном виде: $\Delta x/D$. Так, к примеру, если применительно к полюсным наконечникам-полусферам диаметром $D = 100$ мм [11–13] оговоренные размеры зон составляют порядка 5 мм, то применительно к полюсным наконечникам-полусферам диаметром $D = 135$ мм эти размеры больше практически в 1,35 раза, т.е. примерно 7 мм (рис.1–3).

Отметим еще и то, что, судя по квазилинеаризации данных x_{extr}/D от b/D в полулогарифмических координатах (рис.6,7), в избранном диапазоне b/D они соответствуют функции логарифмического вида. При этом экстремумы силового фактора располагаются на 30–40% ближе к осевой линии полюсов, чем для градиента. Кроме того, для полюсных наконечников-полусфер иного диаметра (в данном случае $D = 135$ мм), как и ранее [11–13] ($D = 100$ мм) наблюдается практически такой же степенной вид зависимостей экстремумов градиента индукции (рис.8, показатель степени: $-1,3$) и силового фактора (рис. 9, показатель степени: $-2,2$) от взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер.

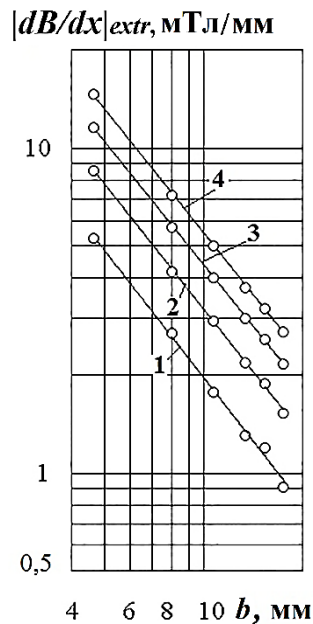


Рис. 8. Иллюстрация степенной зависимости экстремума градиента индукции от взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер

(по факту квазилинеаризации этих данных в логарифмических координатах);

1 – $I=4A$, 2 – $I=8A$, 3 – $I=16A$, 4 – $I=30A$.

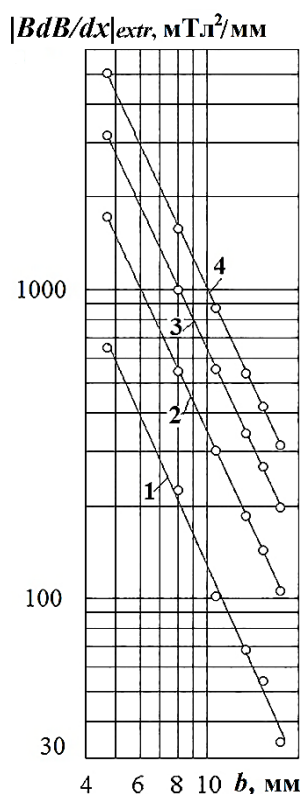


Рис. 9. Иллюстрация степенной зависимости экстремума магнитного силового фактора от взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер (по факту квазилинеаризации этих данных в логарифмических координатах);
1 – $I=4A$, 2 – $I=8A$, 3 – $I=16A$, 4 – $I=30A$.

Таким образом, полученные и подвергнутые анализу данные позволяют резюмировать следующее. Найдены и аналитически обработанные семейства координатных характеристик B , dB/dx , BdB/dx в зависимости от основных параметров функционирования блока, ответственного за создание неоднородного поля в магнетометре Фарадея: токовой нагрузки I , взаимного удаления b между предлагаемыми к использованию наконечниками-полусферами, их диаметра D . Установлены и сопоставлены координаты экстремумов x_{extr} для параметров dB/dx и BdB/dx . Показано, что для каждого из значений b данные x_{extr} как для градиента, так и для силового фактора остаются практически неизменными независимо от I , при этом экстремумы силового фактора располагаются на 30–40% ближе к осевой линии полюсов, чем для градиента. Установлены зависимости (и их функциональный вид) по влиянию b на значения x_{extr} для dB/dx и BdB/dx , а также на экстремальные значения этих параметров: они оказались близкими соответственно

к логарифмической и степенной зависимостям. При этом показано, что при использовании полюсных наконечников-полусфер вполне можно оперировать более универсальными, а именно относительными параметрами b / D и x_{extr} / D .

Список литературы

1. Klaase J.C.P. The Faraday balance, Van der Waals- Zeeman Institute, November 1999 [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.science.uva.nl/research/cmp/klaasse/fdb.html>
2. 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. – V. 2 (1). – P. 32–36.
3. Hosu B.G., Jakab K., Bánki P., Tóth F.I., Forgacs G. Magnetic tweezers for intracellular applications // Rev Scien Instrum. – 2003. – V. 74. – P.4158–4163.
4. Marcon P., Ostanina K. March 27–30, 2012 PIERS Proceedings, Malaysia, Kuala Lumpur. – P. 420–424.
5. 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. – P. 349–354.
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. Slobinsky D., Borzi R.A., Mackenzie A.P., Grigera S. Fast sweep-rate plastic Faraday force magnetometer with simultaneous sample temperature measurement // Review of Scientific Instruments. – 2015. – V. 83 – P. 125104.
8. Reutzel S., Herlach D.M. Measuring magnetic susceptibility of undercooled co-based alloys with a Faraday balance // Advanced Engineering Materials. – 2001. – V. 3. – P. 65–67.
9. Riminucci A., Uhlarz M., R. De Santis, Herrmannsdörfer T. Analytical balance-based Faraday magnetometer // Journal of Applied Physics. – 2017. – V. 121. – P. 094701.

10. 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.

11. Sandulyak A.V., Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Ershova V.A., Sandulyak D.A., Kiselev D.O. On the issue of choosing the measuring zones in a Faraday balance when studying magnetic susceptibility of small samples // *Applied Physics, System Science and Computers*. – 2017. – P. 77–83.

12. Sandulyak A.V., Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Kiselev D.O., Sandulyak D.A., Ershova V.A. The working zone in the interpolar area of the Faraday balance: an approach to testing the magnetic force factor stability criterion // *2017 MATEC Web of Conferences* – V. 108. – P. 01007. DOI: 10.1051/710801007.

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

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