

**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 ВЗАЙМНОМ 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-полусфераы, 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 высокоэнергетических 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 получающаяся 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  $D=100\text{ mm}$  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  $D = 135 \text{ мм}$  – при их различных взаимных удалениях  $b$  – от  $4,7 \text{ мм}$  до  $17,6 \text{ мм}$  и различных значениях тока питания обмотки  $I$  – от  $4 \text{ A}$  до  $30 \text{ A}$ . 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).

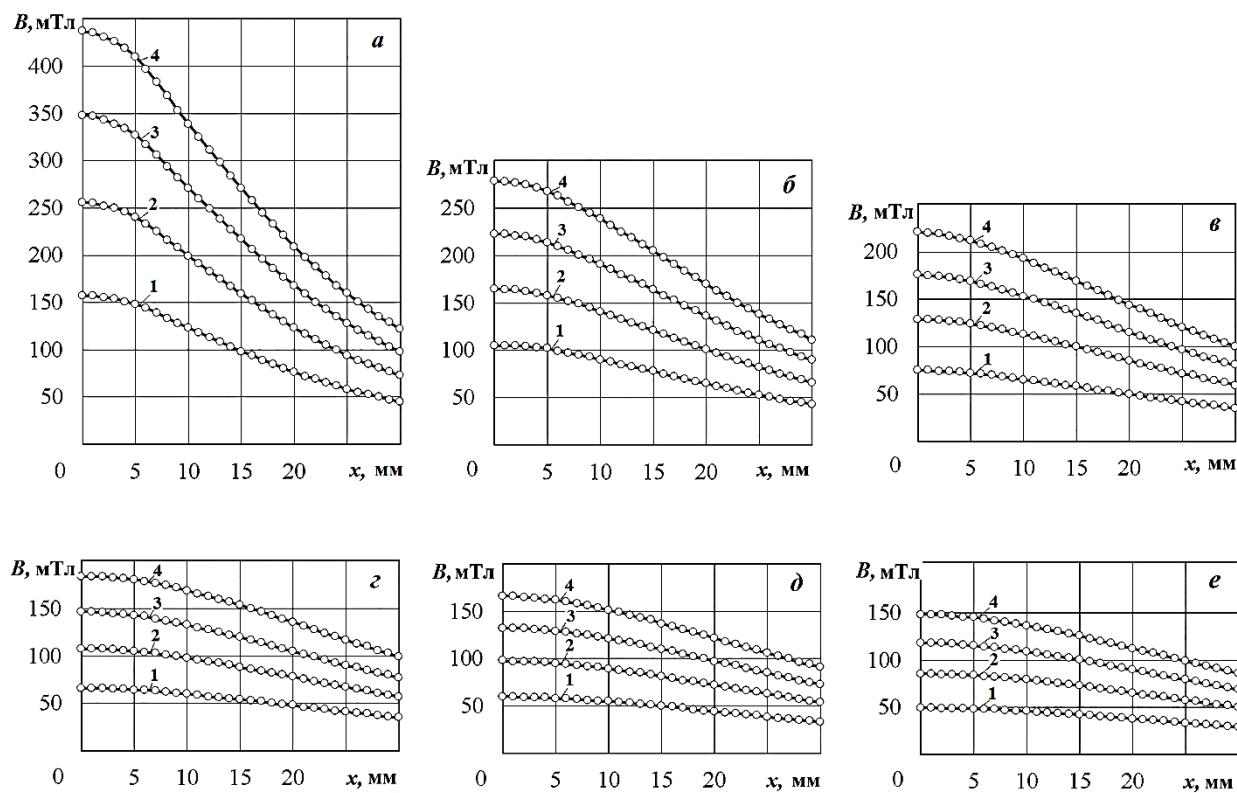


Рис. 1. Координатные характеристики индукции поля между полюсными наконечниками-полусферами, точки – эксперимент, линии – расчет с использованием полинома;  $a) b = 4,7 \text{ мм}, \bar{b}) b = 8,1 \text{ мм}, \bar{c}) b = 10,8 \text{ мм},$   
 $\bar{d}) b = 13,5 \text{ мм}, \bar{e}) b = 15,5 \text{ мм}, 1 - I = 4 \text{ A}, 2 - I = 8 \text{ A}, 3 - I = 16 \text{ A}, 4 - I = 30 \text{ A}$

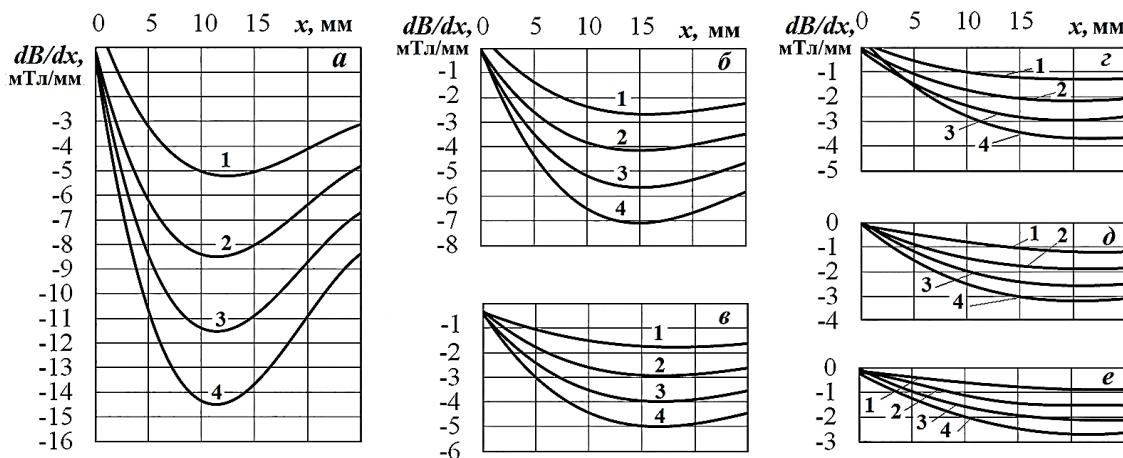


Рис. 2. Координатные характеристики градиента, полученные на основании данных рис. 1

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
	<i>11,41</i>	<i>14,88</i>	<i>17,05</i>	<i>20,24</i>	<i>20,99</i>	<i>22,27</i>

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).

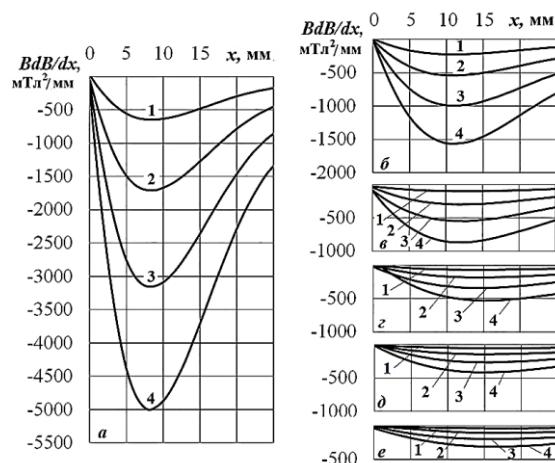


Рис. 3. Координатные характеристики магнитного силового фактора, полученные на основании данных рис. 1 и рис. 2

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.

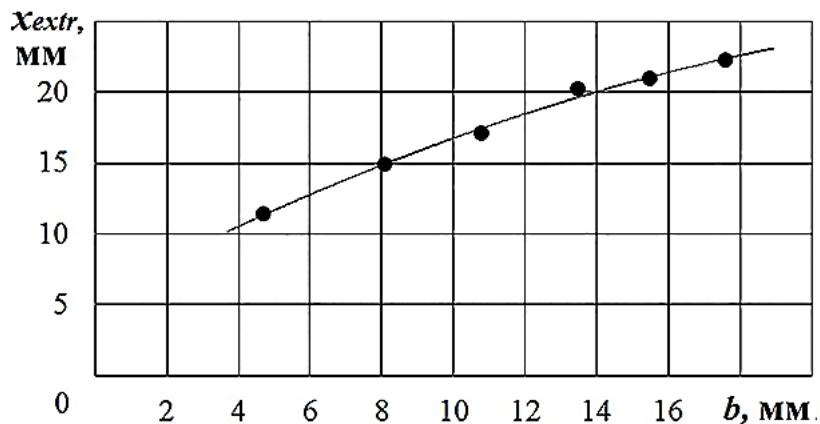


Рис. 4. Влияние взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер ( $D = 135$  мм) на координату экстремума градиента индукции (условного центра зоны его стабильности)

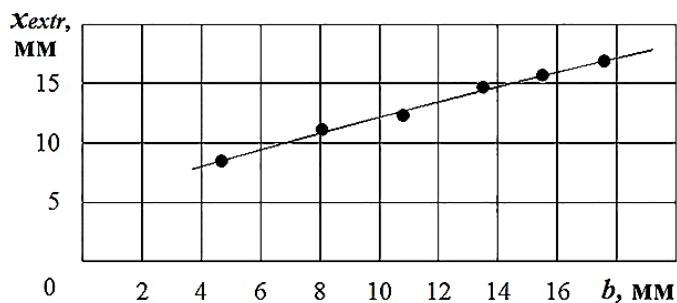


Рис. 5. Влияние взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер ( $D = 135$  мм) на координату экстремума магнитного силового фактора (условного центра зоны его стабильности)

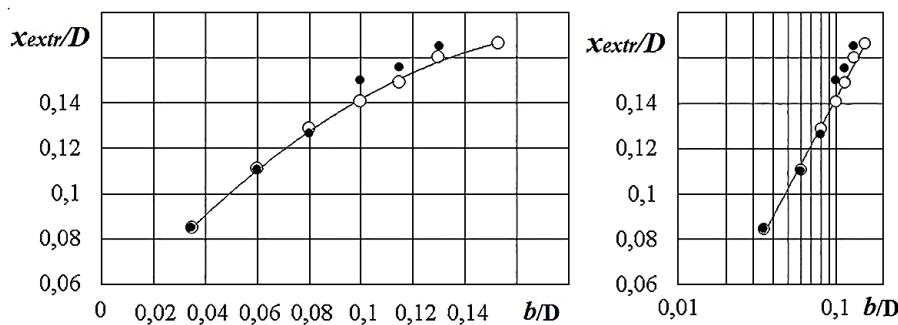


Рис. 6. Влияние относительных значений взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер на относительную координату экстремума градиента индукции,  $\circ$  –  $D=100$  мм (данные [11–13]),  $\bullet$  –  $D=135$  мм (по данным рис.4); в полулогарифмических координатах данные квазилинеаризуются, что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

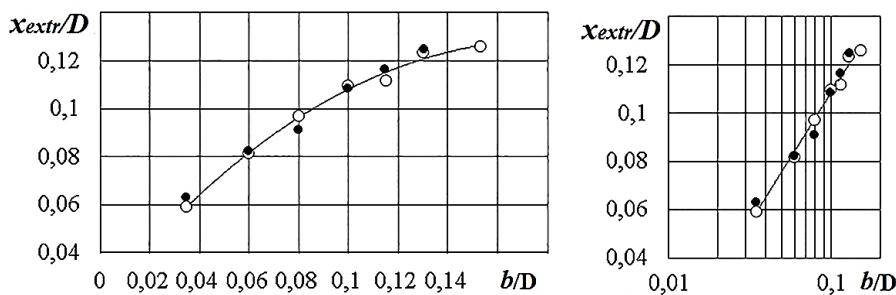


Рис. 7. Влияние относительных значений взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер на относительную координату экстремума магнитного силового фактора;  $\circ$  –  $D=100$  мм (данные [11–13]),  $\bullet$  –  $D=135$  мм (по данным рис. 5); в полулогарифмических координатах данные квазилинеаризуются,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

Разумеется, сказанное в полной мере касается и размеров самих зон (интервалов  $x$ ), т.е.  $\Delta x$  (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.

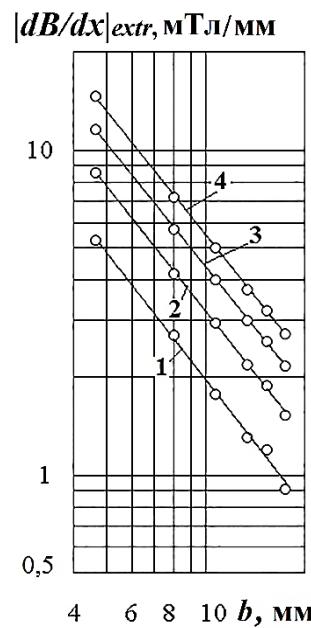


Рис. 8. Иллюстрация степенной зависимости экстремума градиента индукции от взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер (по факту квазилинеаризации этих данных в логарифмических координатах);  
 $1 - I=4A, 2 - I=8A, 3 - I=16A, 4 - I=30A$ .

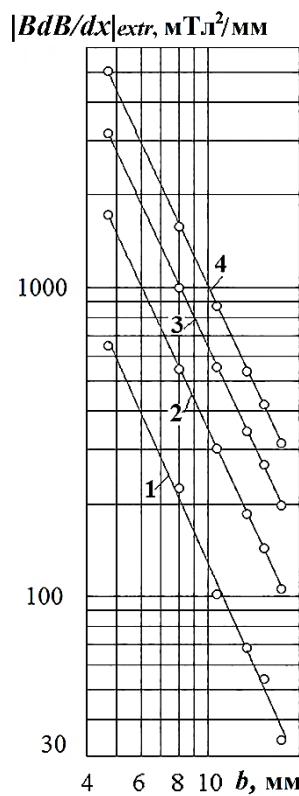


Рис. 9. Иллюстрация степенной зависимости экстремума магнитного силового фактора от взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер (по факту квазилинеаризации этих данных в логарифмических координатах);  
 1 –  $I=4A$ , 2 –  $I=8A$ , 3 –  $I=16A$ , 4 –  $I=30A$ .

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 sea-water // 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.