

УДК 550.380.8; 621.317.412

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-55-68>

EDN PEJBLG



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Расширение возможностей новых магнитометров пондеромоторного и магнитно-реологического типов с полюсами-полусферами

М.Н. Полисмакова¹, Д.А. Сандуляк^{1,®}, А.С. Харин¹, Д.А. Головченко¹,
А.А. Сандуляк¹, А.В. Сандуляк¹, Н.М. Baskonus²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Harran University, Sanliurfa, 63190 Turkey

® Автор для переписки, e-mail: d.sandulyak@mail.ru

• Поступила: 25.01.2025 • Доработана: 07.03.2025 • Принята к опубликованию: 16.05.2025

Резюме

Цели. Для определения магнитной восприимчивости малообъемных объектов применяются магнитометры пондеромоторного и магнитно-реологического типов с полюсами-полусферами, позволяющими создавать требуемое для лимитированной рабочей зоны магнитное поле. Цель работы – проведением соответствующих исследований показать, что возможности новых созданных магнитометров могут быть расширены.

Методы. Исследование проводится согласно оригинальному методу, включающему получение координатной характеристики индукции поля B (посредством прямых пошаговых измерений датчиком Холла) в межполюсном пространстве по линии действия пондеромоторной силы с последующим нахождением координатной характеристики градиента.

Результаты. В магнитометрах с применением полюсов-полусфер повышенного диаметра D : 157 и 184 мм, взаимно разобщаемых на то или иное расстояние b , экспериментально получены ключевые зависимости магнитной индукции B при пошаговом удалении x от центра симметрии межполюсной области по линии действия пондеромоторной силы, а по ним – зависимости градиента $\text{grad}B = dB/dx$. Характерный перегиб каждой из кривых зависимостей B от x и индивидуальный экстремум последовавших из них кривых зависимостей dB/dx от x , в окрестности которого значения dB/dx практически одинаковы, отвечает требованию выбора дислокации исполнительной (рабочей) зоны, где неоднородность поля практически постоянна.

Выводы. По установленным и обобщенным зависимостям B от x и dB/dx от x найдены координаты дислокации исполнительной зоны. Для вычисления этих координат, зависящих от величин D и b и не зависящих от намагничивающей силы обмотки, получены аналитические (феноменологические) выражения степенного и логарифмического вида. Показана возможность использования этих выражений для идентификации исполнительной зоны магнитометров, не прибегая к проведению дополнительных серий экспериментов. Показана целесообразность применения полюсов-полусфер повышенного диаметра, что позволяет увеличить протяженность исполнительной зоны и проводить исследования с образцами более широкого спектра размеров.

Ключевые слова: пондеромоторный принцип, магнитометр, магнитная восприимчивость образца, исполнительная зона, координатные характеристики индукции и градиента, степенная связь, логарифмическая связь

Для цитирования: Полисмакова М.Н., Сандуляк Д.А., Харин А.С., Головченко Д.А., Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Baskonus H.M. Расширение возможностей новых магнитометров пондеромоторного и магнитно-реологического типов с полюсами-полусферами. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):55–68. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-55-68>, <https://www.elibrary.ru/PEJBLG>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Expanding the capabilities of new magnetometers of ponderomotive and magnetic-rheological types with hemispherical poles

Maria N. Polismakova¹, Daria A. Sandulyak^{1, @}, Alexey S. Kharin¹,
Daria A. Golovchenko¹, Anna A. Sandulyak¹, Alexander V. Sandulyak¹,
Haci M. Baskonus²

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Harran University, Sanliurfa, 63190 Turkey

@ Corresponding author, e-mail: d.sandulyak@mail.ru

• Submitted: 25.01.2025 • Revised: 07.03.2025 • Accepted: 16.05.2025

Abstract

Objectives. The work sets out to explain the expanded capabilities of new magnetometers by conducting appropriate studies. In order to determine the magnetic susceptibility of small-volume objects, ponderomotive and magnetic-rheological magnetometers with hemispherical pole pieces are used to create the magnetic field required for a limited working zone.

Methods. The research is carried out using an original method, which includes finding the coordinate characteristic of the induction of the field B through direct step-by-step measurements by the Hall sensor in the interpolar space along the line of action of the ponderomotive force to provide a basis for obtaining the coordinate characteristic of the gradient.

Results. In magnetometers using hemispherical poles of increased diameter D : 157 and 184 mm, mutually disconnected from one or another by the distance b , the desired key dependencies of magnetic induction B were experimentally obtained (with a step-by-step distance x from the center of symmetry of the interpolar space along the line of action of the ponderomotive force) to provide the dependence of the gradient $\text{grad}B = dB/dx$. The characteristic inflection of each of the curves B from x and corresponding individual extremum of the following curves dB/dx from x , in the vicinity of which the values of dB/dx are practically stable, meets the requirement of determining the dislocation of the executive (working) zone such that the inhomogeneity of the field is almost constant.

Conclusions. Coordinates of executive zone dislocation are obtained from established and generalized dependencies B from x and dB/dx from x . To calculate these coordinates, which depend on D and b but do not

depend on the magnetizing force of the winding, the corresponding analytical (phenomenological) expressions of power and logarithmic form are obtained. The possibility of using these expressions to identify the executive zone of magnetometers without resorting to additional series of experiments is shown. The expediency of using hemispherical pole pieces of increased diameter is also demonstrated. On this basis, the length of the executive zone can be increased to conduct studies with samples of a wider range of sizes.

Keywords: ponderomotive principle, magnetometer, magnetic susceptibility of the sample, executive zone, coordinate characteristics of induction and gradient, power dependence, logarithmic dependence

For citation: Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Kharin A.S., Golovchenko D.A., Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Baskonus H.M. Expanding the capabilities of new magnetometers of ponderomotive and magnetic-rheological types with hemispherical poles. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):55–68. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-55-68>, <https://www.elibrary.ru/PEJBLG>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В науке и технике востребованным является получение данных о магнитных свойствах дисперсных материалов, в частности, композитов, порошков, суспензий [1–13]. Особую актуальность этот вопрос приобретает тогда, когда в распоряжении имеется сравнительно небольшой объем изучаемого материала, например, мелкие пробы ферропримесей, выделенные из технологических сыпучих и жидких сред в лабораторных целях.

В связи с этим весьма важно иметь соответствующие средства контроля магнитных свойств малообъемных образцов, в качестве которых, на наш взгляд, предпочтительными продолжают оставаться те магнитометры, которые основаны на пондеромоторном принципе [14–25]. Современным направлением в создании средств контроля магнитных характеристик тел малых размеров, в т.ч. малообъемных дисперсных образцов, их отдельных частиц, в частности, магнитной восприимчивости, является применение в подобного рода магнитометрах полюсных наконечников-полусфер [26–32] (рис. 1). Такое решение позволяет без обычно возникающих в подобных случаях сложностей получать необходимую рабочую зону, т.е. зону стабильной (по определенной координате, как правило – согласно действию пондеромоторной силы) неоднородности: градиента и/или магнитного силового фактора. Указание на дислокацию этой зоны отображено на рис. 1 в виде утолщения на оси x , как оси, вдоль которой осуществляется подвешивание изучаемого образца или принудительное перемещение в жидкости изучаемой частицы.

Для идентификации этой зоны в межполюсной области магнитометра необходимо получить координатные характеристики напряженности H (или индукции B) создаваемого неоднородного магнитного поля [26–32]. Поскольку среда в межполюсной области воздушная, для которой относительная магнитная проницаемость близка к единице, величины H и B

связаны лишь посредством константы: $H = B/\mu_0$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

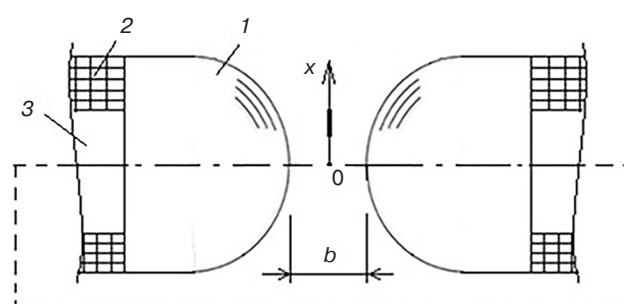


Рис. 1. О применении полюсных наконечников-полусфер 1 в электромагнитной системе с обмоткой 2 на магнитопроводе 3 в магнитометрах, основанных на пондеромоторном принципе

При этом условии наличия в пределах рабочей зоны создаваемого неоднородного поля того или иного стабильного (практически постоянно) значения, например, градиента напряженности $\text{grad}H$ (или градиента индукции $\text{grad}B$), однозначно является следующее. Значения напряженности поля H (индукции B) в пределах такой зоны, в частности, в том направлении x , в котором действует пондеромоторная сила F (рис. 1), измеряемая в магнитометре, должны соответствовать линейной зависимости. Только в этом случае соответствующее дифференцирование такой зависимости, т.е. переход к искомой зависимости dH/dx или dB/dx , будет демонстрировать постоянство (здесь – стабильность вдоль координаты x) интересующего нас параметра $dH/dx \cong \text{grad}H = \text{const}$ или $dB/dx \cong \text{grad}B = \text{const}$.

Вместе с тем, уже хорошо зарекомендовавшие себя магнитометры, пригодные для реализации этих методов, содержат полюса-полусферы сравнительно небольшого диаметра $D = 100$ мм и 135 мм [26, 27, 29–32]. Это несколько ограничивает получаемую необходимую исполнительную зону, имея в виду ее дислокацию и саму

протяженность в объективно несколько стесненном межполюсном пространстве.

Возможности таких магнитометров можно расширить, применяя полюса-полусферы большего диаметра D . Разумеется, это требует выполнения комплекса исследований – с получением координатных (вдоль направления x действия пондеромоторной, т.е. магнитной, силы) характеристик индукции B (напряженности H), градиента $\text{grad}B \cong dB/dx$ ($\text{grad}H \cong dH/dx$), силового фактора $B\text{grad}B$ ($H\text{grad}H$) и, как следствие, обобщенных аналитических зависимостей, что необходимо для оперативного прогнозирования и контроля местоположения искомой рабочей зоны, а именно, зоны относительно стабильной неоднородности поля. При этом важно установить, в какой мере такие зависимости согласуются с ранее установленными зависимостями, полученными в [26–32] для полюсов-полусфер меньшего диаметра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее упомянуто, что для идентификации исполнительной зоны магнитометров оговоренного пондеромоторного принципа, основанных на проявлении пондеромоторной, т.е. магнитной силы, ключевой является координатная характеристика индукции B (напряженности H) магнитного поля между полюсами, здесь – полюсами-полусферами.

Как и в [26–32], пошаговые значения B вдоль избранного направления x (рис. 1) измерялись миллитесламетром, датчик (Холла) которого размещали на координатном столике. При этом заметим, что направление x перемещения датчика, которое должно лежать в плоскости симметрии области между полюсными наконечниками-полусферами, вправе выбирать экспериментатор, совершая перемещение датчика в наиболее удобном для выполнения измерений одном из вариантов такого направления – с конкретными значениями x , соответствующими расстоянию от осевой линии полюсов до текущего расположения датчика. На рис. 1 это направление показано вверх, а в реальном исполнении более удобным являлось перемещение в перпендикулярном чертежу направлении – на себя.

Опыты поочередно выполнены с использованием двух пар полюсных наконечников-полусфер диаметром по $D = 157$ мм и по $D = 184$ мм, взаимно удаляемых на то или иное расстояние b : для $D = 157$ мм – от $b = 9.5$ мм до $b = 24$ мм; для $D = 184$ мм – от $b = 6.5$ мм до $b = 28$ мм. Намагничивающую силу $I\omega$ обмотки электромагнитной системы (рис. 1) варьировали величиной тока питания I в пределах $I\omega = 3000$ – 22500 А. Здесь число витков обмотки $\omega = 3000$.

Результаты пошаговых измерений магнитной индукции B в принятом направлении x (рис. 1) между полюсами-полусферами диаметром $D = 157$ мм приведены на рис. 2 (точки) – для разных значений $I\omega$ и b . Это позволило получить соответствующие координатные характеристики (линии) B и $dB/dx \cong \text{grad}B$. Для этого опытные данные B (рис. 2, точки) подвергали аппроксимации (рис. 2, линии) полиномом четвертой степени, используя программную среду *Advanced Grapher*¹.

Уже сам извилистый вид координатных характеристик B от x на рис. 2, когда прослеживается их перегиб, как и в [26–32], свидетельствует о возможности искусственной линейной (упрощенной) аппроксимации зависимостей индукции B от координаты x – именно в окрестности точки перегиба каждой из этих зависимостей. Значит, здесь, т.е. где участок кривой B от x поддается линейной аппроксимации, градиент индукции $\text{grad}B = dB/dx$ является практически постоянной величиной.

Это находит подтверждение в экстремальном виде координатных характеристик градиента (рис. 2), судя по весьма близким значениям градиента (ограниченная зона) в окрестности экстремума.

Из полученных координатных характеристик градиента (рис. 2) непосредственно следует информация о координате (абсциссе) экстремума каждой из этих характеристик, т.е. величины $x = x_{\text{extr}}$ (табл. 1), а значит о координате дислокации соответствующей исполнительной, а именно, рабочей зоны между полюсами-полусферами диаметром $D = 157$ мм.

¹ <https://www.alentum.com/agraper/>. Дата обращения 12.05.2025. / Accessed May 12, 2025.

Таблица 1. Координаты экстремума x_{extr} (дислокации зоны стабильного градиента) между полюсами-полусферами диаметром $D = 157$ мм при разных значениях намагничивающей силы $I\omega$ обмотки и разных расстояниях b между полюсами-полусферами

$I\omega$, А	x_{extr} , мм					
	$b = 9.5$ мм	$b = 13$ мм	$b = 15.5$ мм	$b = 18$ мм	$b = 21$ мм	$b = 24$ мм
3000	17.60	22.26	21.90	22.34	22.17	27.70
6000	18.15	20.86	22.73	22.41	26.21	26.01
12000	17.50	20.54	21.17	22.76	29.49	27.46
22500	17.65	19.58	21.61	22.75	24.12	26.58
Среднее	17.73	20.81	21.85	22.57	25.5	26.94

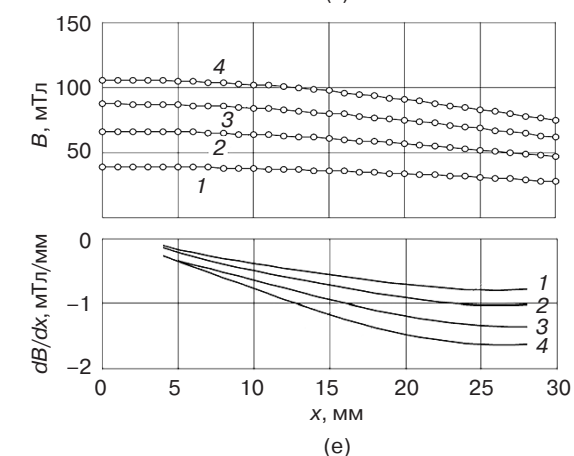
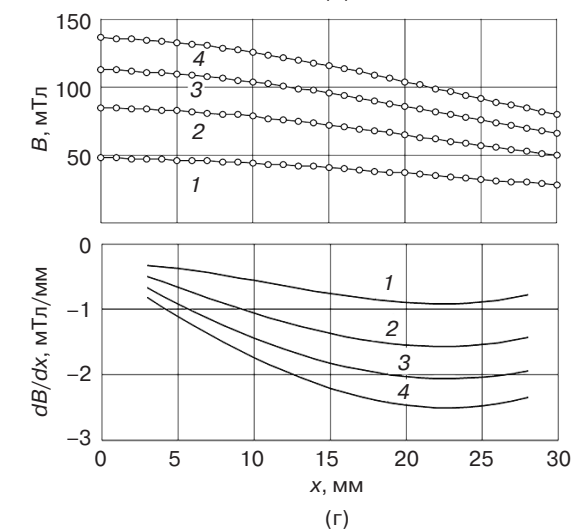
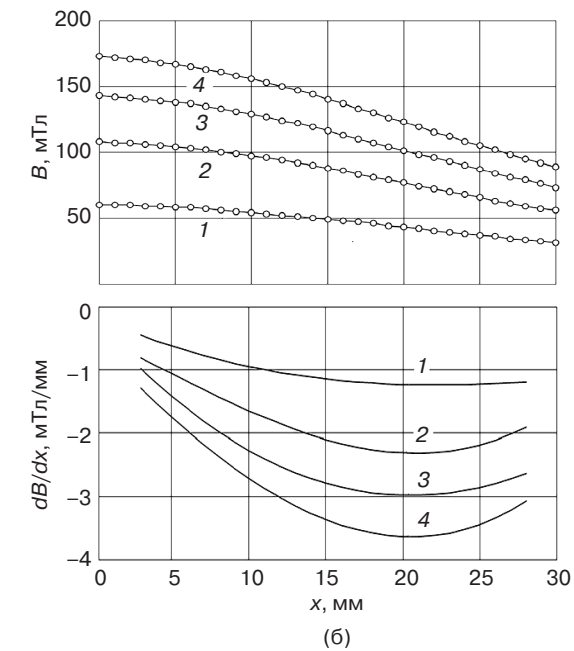
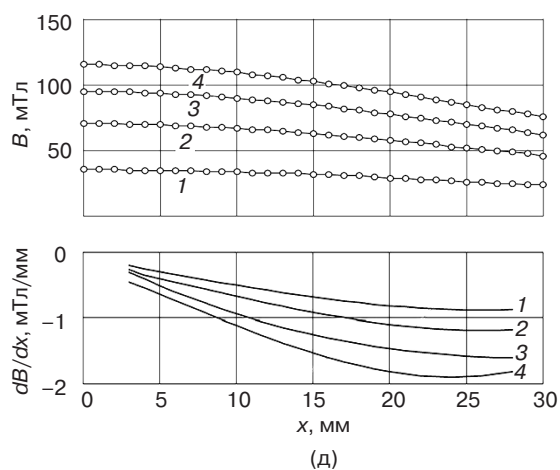
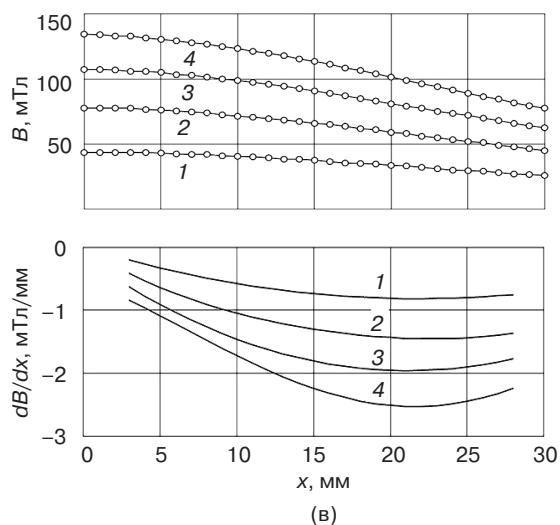
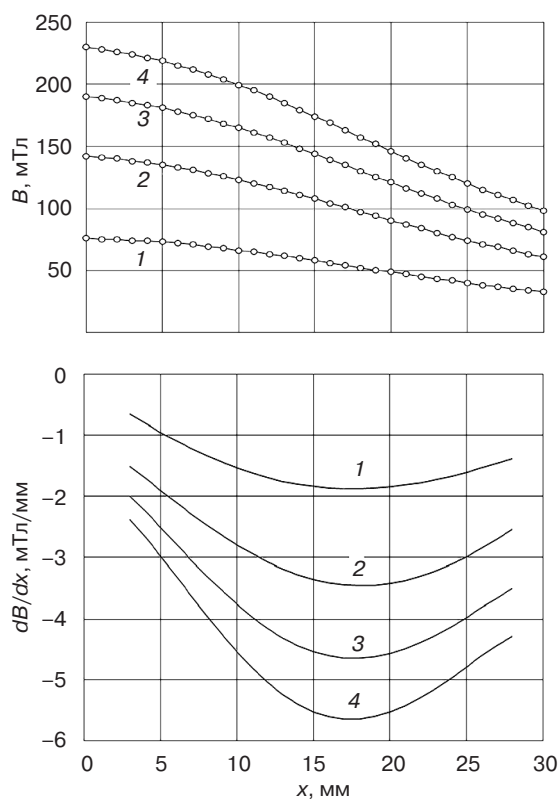


Рис. 2. Координатные характеристики индукции и градиента поля между полюсами-полусферами диаметром $D = 157$ мм при их взаимном удалении b : (а) 9.5 мм, (б) 13 мм, (в) 15.5 мм, (г) 18 мм, (д) 21 мм, (е) 24 мм; для значений намагничивающей силы $I\omega$: (1) 3000 А, (2) 6000 А, (3) 12000 А, (4) 22500 А

Полученные данные x_{extr} указывают на отмечавшийся ранее важный факт: несмотря на разные значения намагничивающей силы $I\omega$ обмотки электромагнитной системы магнитометра значения координат экстремумов характеристик градиента индукции поля (рис. 2) при одном и том же значении b (т.е. координат дислокации рабочих зон) весьма близки друг к другу.

Этот факт, уже обнаруженный ранее для полюсов-полусфер меньшего диаметра [26–32], тем более усиливается, если представить ординаты исходных характеристик, имеющих на рис. 2, в относительных величинах, а именно как отношение текущих (по x) значений индукции B к индивидуальному «стартовому» значению индукции B_0 , полученному при $x = 0$, т.е. как B/B_0 , для соответствующего значения намагничивающей силы $I\omega$.

На рис. 3 в качестве примера показаны такие характеристики, полученные по данным, заимствованным из рис. 2а. Видно, что независимо от величины $I\omega$ данные B/B_0 обобщаются единой зависимостью; здесь, в отличие от рис. 2а, обозначения точек намерено изменены – с соответствующим перегибом этой зависимости. Это указывает и на единую дислокацию рабочих зон, разумеется, при одном и том же взаимном удалении b полюсов-полусфер. Столь же показательными являются зависимости B/B_0 от x для других значений b (рис. 4).

Оговоренные выше аргументы являются методически важными для экспериментатора: при выполнении опытов по определению влияния величины поля на магнитную восприимчивость образца не следует изменять его дислокацию между полюсами.

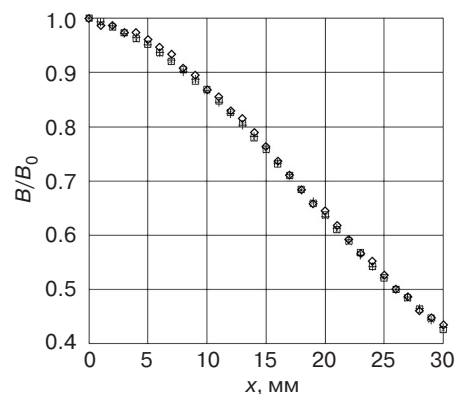


Рис. 3. Обобщенные (по данным рис. 2а) координатные характеристики индукции B в относительных величинах B/B_0 , $b = 9.5$ мм, для значений намагничивающей силы $I\omega$: $\diamond$ 3000 А, $+$ 6000 А, $\square$ 12000 А, $\times$ 22500 А

На протяженность зоны (по координате x) практически постоянных значений параметра $\text{grad}B$, т.е. на протяженность рабочей зоны магнитометра, указывают данные рис. 2–4, а именно, те участки зависимостей индукции B и относительной индукции B/B_0 от x , которые поддаются линейной аппроксимации (участки в окрестности точки перегиба таких зависимостей).

Еще более наглядно на протяженность рабочей зоны магнитометра указывают координатные характеристики параметра $\text{grad}B$ (рис. 2): эта зона локализуется в окрестности экстремума той или иной зависимости параметра $dB/dx = \text{grad}B$ от x .

Полученные данные (табл. 1) о координате x_{extr} дислокации рабочей зоны магнитометра в зависимости от взаимного удаления b полюсов-полусфер диаметром $D = 157$ мм показаны на рис. 5а (точки $\square$). На рис. 5б (точки $\blacksquare$) показаны аналогичные данные,

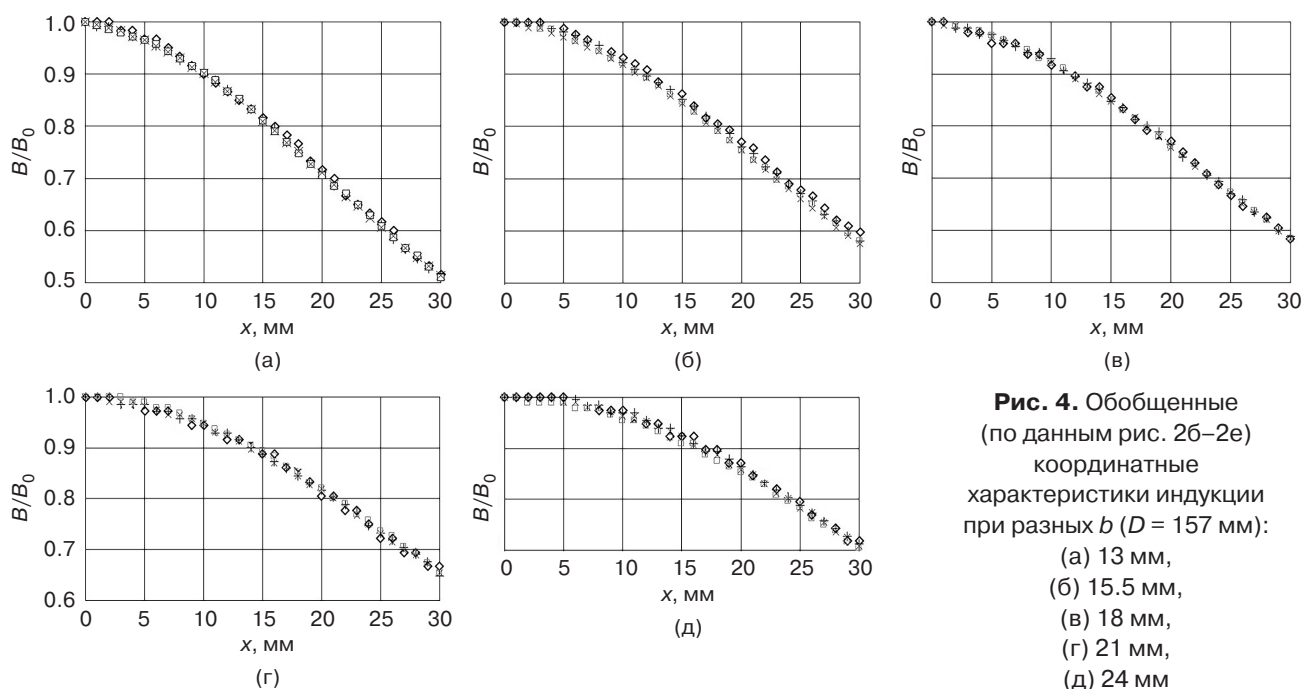


Рис. 4. Обобщенные (по данным рис. 2б–2е) координатные характеристики индукции при разных b ($D = 157$ мм): (а) 13 мм, (б) 15.5 мм, (в) 18 мм, (г) 21 мм, (д) 24 мм

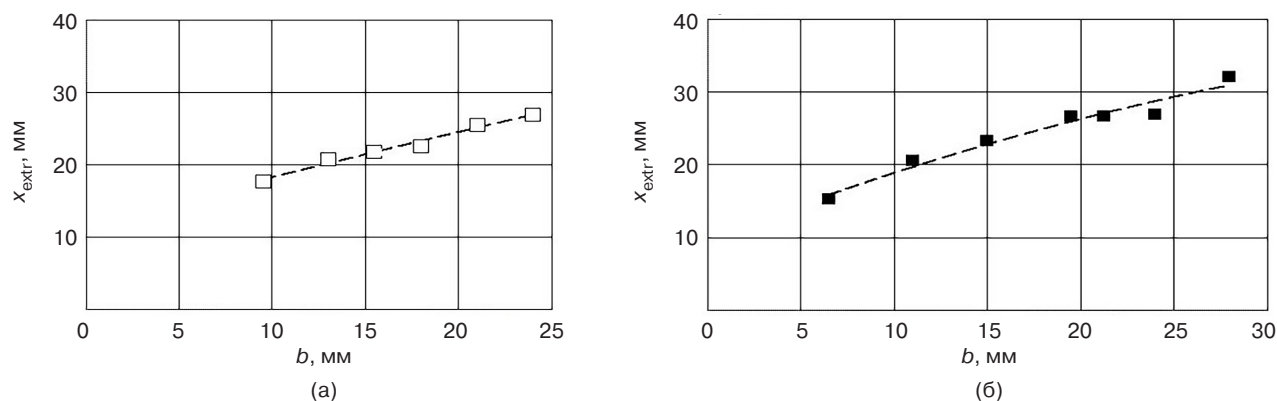


Рис. 5. Зависимость координаты дислокации рабочей зоны магнитометра от расстояния между его полюсами-полусферами диаметром $D = 157$ мм (а) и $D = 184$ мм (б)

полученные с использованием полюсов-полусфер диаметром $D = 184$ мм. Информация, подобная показанной ранее на рис. 2–4 и в табл. 1, при $D = 184$ мм приведена на рис. 6, 7 и в табл. 2.

Важно отметить, что если данные, полученные для обеих пар полюсов-полусфер (табл. 1, табл. 2, рис. 5), т.е. для $D = 157$ мм и $D = 184$ мм, представить в более универсальном, безразмерном виде, а именно как x_{extr}/D от b/D (рис. 8), то последует ожидаемый (подобно [31]) результат – они обобщаются единой зависимостью.

Представление этих данных в полулогарифмических координатах (рис. 8б) показывает возможность их квазилинеаризации в этих координатах в исследуемом диапазоне $b/D = 0.035 \dots 0.153$ с получением расчетной формулы логарифмического вида:

$$\frac{x_{extr}}{D} = A \ln \frac{b/D}{k} \quad (1)$$

при значениях феноменологических параметров $A = 0.061$ и $k = 0.0096$.

Возможность квазилинеаризации тех же данных наблюдается и в логарифмических координатах (рис. 8в) – с получением альтернативной расчетной формулы степенного вида:

$$\frac{x_{extr}}{D} = G \left(\frac{b}{D} \right)^z \quad (2)$$

при значениях феноменологических параметров $G = 0.43$ и $z = 0.48$.

Представляет интерес сравнение найденных выражений (1) и (2) с соответствующими выражениями, полученными ранее для полюсов-полусфер меньшего диаметра: $D = 100$ мм и $D = 135$ мм [31]. Важно отметить, что, оставаясь сходными функционально, сравниваемые выражения несколько отличаются лишь значениями феноменологических параметров A , k , G и z : $A = 0.061$ вместо $A = 0.063$, $k = 0.0096$ вместо $k = 0.0095$, $G = 0.43$ вместо $G = 0.45$, $z = 0.48$ вместо $z = 0.5$.

Если произвести совместную обработку данных, полученных для полюсов-полусфер повышенного диаметра, а именно $D = 157$ мм и $D = 184$ мм, с данными, полученными ранее для полюсов-полусфер меньшего диаметра, а именно $D = 100$ мм и $D = 135$ мм, то обобщенная зависимость, представленная на рис. 9, в полулогарифмических (рис. 9б) и логарифмических (рис. 9в) координатах, примет вид, аналогичный (1) и (2), со значениями феноменологических параметров $A = 0.061$, $k = 0.0094$, $G = 0.43$ и $z = 0.48$.

Таблица 2. Координаты экстремума x_{extr} между полюсами-полусферами диаметром $D = 184$ мм при разных значениях намагничивающей силы $I\omega$ обмотки и разных расстояниях b между полюсами-полусферами

$I\omega$, А	x_{extr} , мм						
	$b = 6.5$ мм	$b = 11$ мм	$b = 15$ мм	$b = 19.5$ мм	$b = 21.2$ мм	$b = 24$ мм	$b = 28$ мм
3000	15.65	20.75	23.71	—	26.3	25.58	32.20
6000	15.59	20.67	23.44	26.77	26.965	28.2	32.17
12000	14.89	20.55	22.97	26.71	27.25	28.025	32.32
22500	14.81	20.27	22.81	—	25.85	25.66	31.86
Среднее	15.24	20.56	23.23	26.74	26.59	26.87	32.14

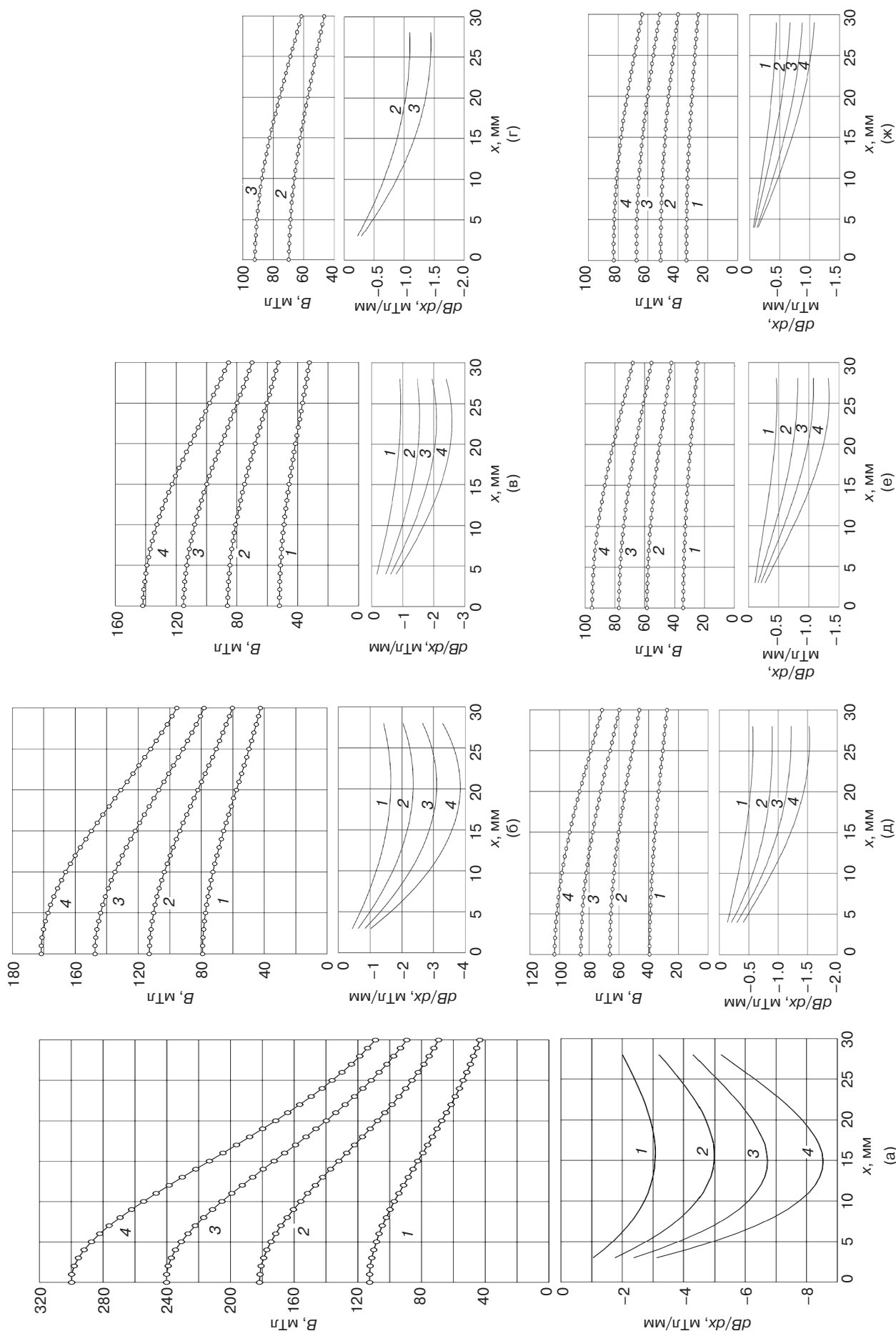


Рис. 6. Координатные характеристики индукции и градиента поля между полюсами-полусферами диаметром $D = 184$ мм при их взаимном удалении b : (a) 6.5 мм, (б) 11 мм, (в) 15 мм, (г) 19.5 мм, (д) 21.2 мм, (е) 24 мм, (ж) 28 мм; для значений намагничивающей силы $i\omega$: (1) 3000 А, (2) 6000 А, (3) 12000 А, (4) 22500 А

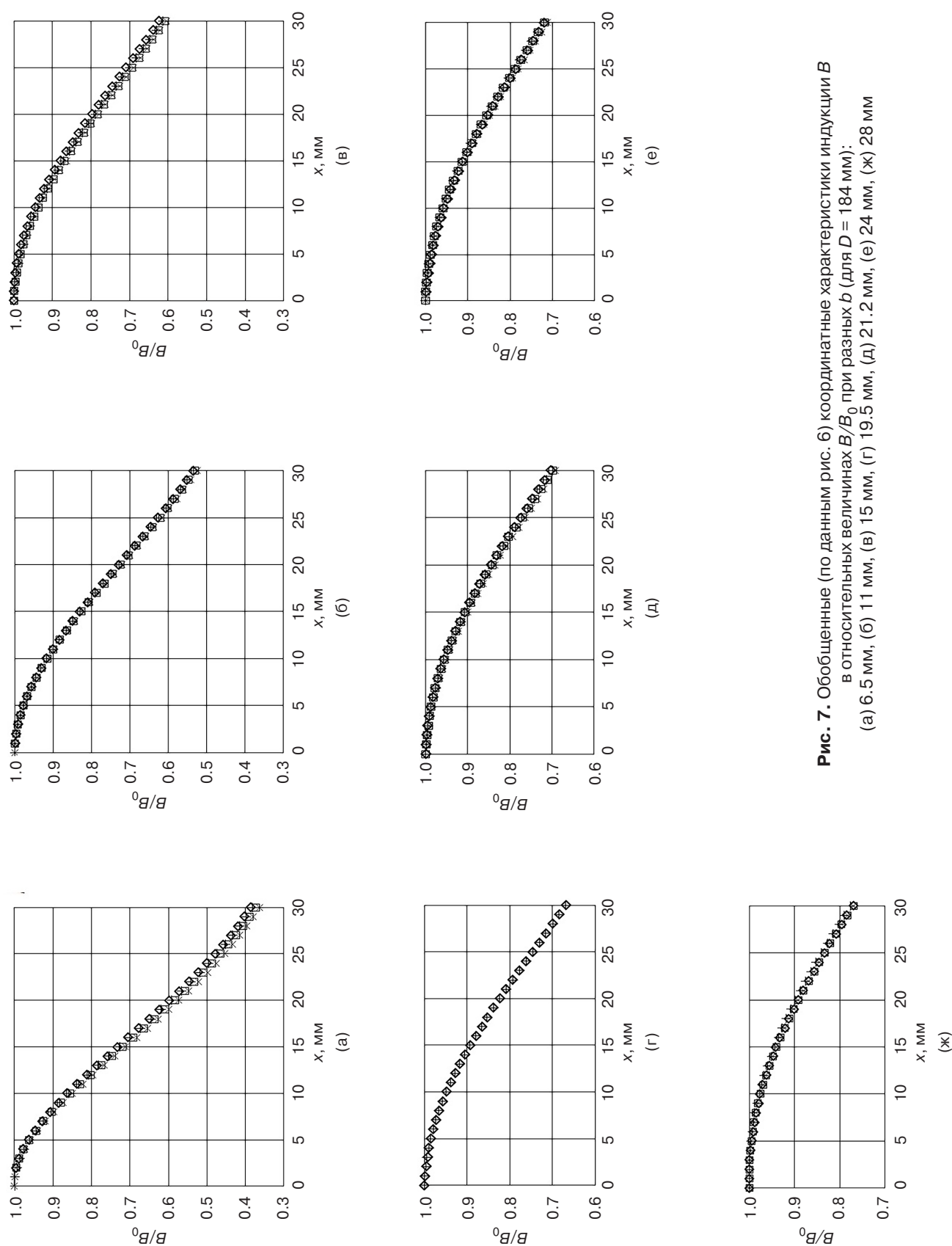


Рис. 7. Обобщенные (по данным рис. 6) координатные характеристики индукции B в относительных величинах B/B_0 при разных b (для $D = 184$ мм):
(а) 6.5 мм, (б) 11 мм, (в) 15 мм, (г) 19.5 мм, (д) 21.2 мм, (е) 24 мм, (ж) 28 мм

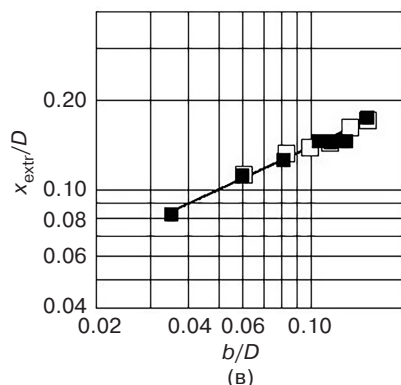
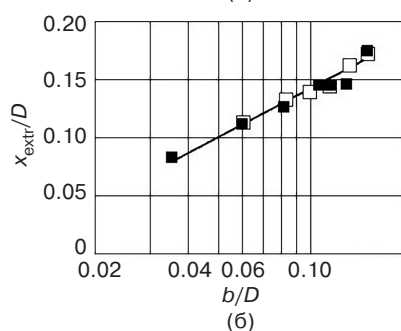
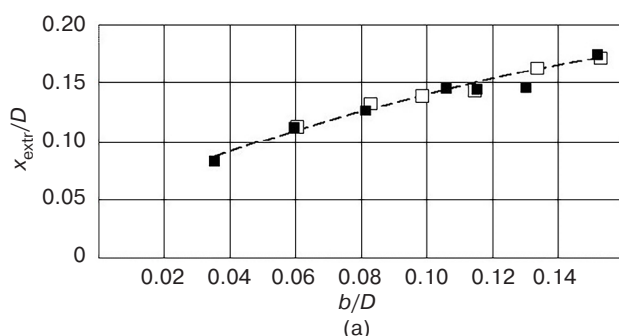


Рис. 8. Зависимость относительной координаты дислокации рабочей зоны магнитометра от относительного расстояния между его полюсами-полусферами диаметром D ($\square$ 157 мм, $\blacksquare$ 184 мм) в обычных (а), полулогарифмических (б) и логарифмических (в) координатах

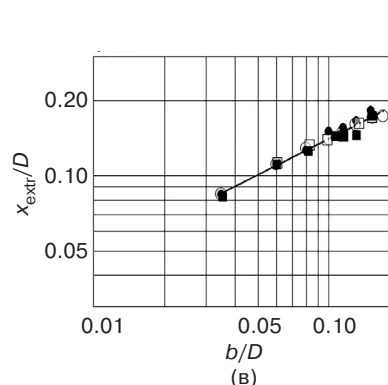
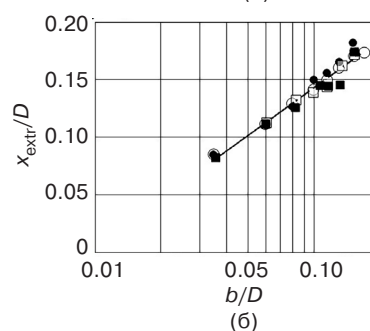
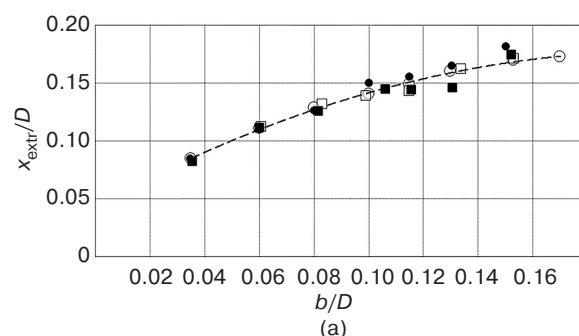


Рис. 9. Обобщенная зависимость относительной координаты дислокации рабочей зоны магнитометра от относительного расстояния между его полюсами-полусферами диаметром D ($\circ$ 100 мм, $\bullet$ 135 мм, $\square$ 157 мм, $\blacksquare$ 184 мм) в обычных (а), полулогарифмических (б) и логарифмических (в) координатах

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен вопрос расширения возможностей магнитометров пондеромоторного и магнитно-реологического типов, предназначенных для контроля магнитной восприимчивости объектов малых размеров: как дисперсных, так и отдельных частиц.

В дополнение к ранее полученным данным, установленным при использовании пар полюсов-полусфер диаметрами $D = 100$ мм и 135 мм, получены данные для полусфер повышенного диаметра $D = 157$ мм и 184 мм, взаимно разобобщаемых на то или иное расстояние b .

Экспериментально определены ключевые зависимости магнитной индукции B при пошаговом удалении x от центра симметрии межполюсной области,

т.е. по линии действия пондеромоторной силы, а по ним – зависимости градиента $\text{grad}B \cong dB/dx$. Это позволяет установить характерный перегиб каждой из кривых зависимостей B от x и экстремум каждой из кривых зависимостей dB/dx от x , в окрестности которого значения dB/dx практически одинаковы, что отвечает требованию постоянства неоднородности поля при выборе дислокации исполнительной зоны.

По установленным и обобщенным зависимостям B от x и dB/dx от x найдены координаты дислокации исполнительной зоны. Для вычисления этих координат, зависящих от величин D и b и не зависящих от намагничивающей силы $I\omega$ обмотки электромагнитной системы, получены аналитические выражения степенного и логарифмического вида.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере науки (проект № FSFZ-2024-0005).

ACKNOWLEDGMENTS

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment in the field of science (project No. FSFZ-2024-0005).

Вклад авторов

М.Н. Полисмакова – концептуализация, проведение исследования, создание рукописи и ее редактирование.

Д.А. Сандуляк – методология, верификация данных, применение математических методов анализа, создание рукописи и ее редактирование.

А.С. Харин – проведение исследования, сбор материалов для исследования.

Д.А. Головченко – сбор и анализ материалов для исследования, создание черновика рукописи.

А.А. Сандуляк – методология, редактирование рукописи.

А.В. Сандуляк – верификация данных, формальный анализ, руководство исследованием.

Н.М. Basconus – верификация данных, сбор материалов для исследования.

Authors' contributions

M.N. Polismakova – conceptualization, conducting a research and investigation process, writing and editing the text of the manuscript.

D.A. Sandulyak – methodology, data verification, applying mathematical methods to analyze data, preparation, writing and editing the text of the manuscript.

A.S. Kharin – conducting the study, collecting materials for the study.

D.A. Golovchenko – collecting and analyzing materials for the study, writing the original draft.

A.A. Sandulyak – methodology, editing the manuscript.

A.V. Sandulyak – data verification, formal analysis, supervision.

H.M. Basconus – data verification, collecting materials for the study.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mosleh N., Insinga A.R., Bahl C.R.H., Bjørk R. The magnetic properties of packings of cylinders. *J. Magn. Magn. Mater.* 2024;607(3):172391. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.172391>
2. Uestuener K., Katter M., Rodewald W. Dependence of the mean grain size and coercivity of sintered Nd–Fe–B magnets on the initial powder particle size. *IEEE Trans. Magn.* 2006;42(10):2897–2899. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.879889>
3. Anhalt M., Weidenfeller B. Magnetic properties of polymer bonded soft magnetic particles for various filler fractions. *J. Appl. Phys.* 2007;101(2):023907. <https://doi.org/10.1063/1.2424395>
4. Schäfer K., Braun T., Riegg S., Musekamp J., Gutfleisch O. Polymer-bonded magnets produced by laser powder bed fusion: Influence of powder morphology, filler fraction and energy input on the magnetic and mechanical properties. *Mater. Res. Bull.* 2023;158(3):112051. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2022.112051>
5. McFarlane J., Weber C., Wiechert A., Yiacoumi S., Tsouris C. High-gradient magnetic separation of colloidal uranium oxide particles from soil components in aqueous suspensions. *Colloids and Surfaces C: Environmental Aspects.* 2024;2:100023. <https://doi.org/10.1016/j.colsuc.2023.100023>
6. Живулько А.М., Янушкевич К.И., Даниленко Е.Г., Зеленов Ф.В., Бандурина О.Н. Магнитные свойства твердых растворов $Mn_{1-x}Gd_xSe$. *Сибирский аэрокосмический журнал.* 2022;23(4):748–755. <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2022-23-4-748-755>
7. Normile P.S., Andersson M.S., Mathieu R., Lee S.S., Singh G., De Toro J.A. Demagnetization effects in dense nanoparticle assemblies. *Appl. Phys. Lett.* 2016;109(15):152404. <https://doi.org/10.1063/1.4964517>
8. Bjørk R., Zhou Z. The demagnetization factor for randomly packed spheroidal particles. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;476:417–422. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.01.005>
9. Walmsley N.S., Chantrell R.W., Gore J.G., Maylin M. Experimental and computational investigation of the magnetic susceptibility of composite soft materials. *J. Phys. D: App. Phys.* 2000;33(7):784–790. <http://doi.org/10.1088/0022-3727/33/7/306>
10. Gao Y., Fujiki T., Dozono H., Muramatsu K., Guan W., Yuan J., Tian C., Chen B. Modeling of Magnetic Characteristics of Soft Magnetic Composite Using Magnetic Field Analysis. *IEEE Trans. Magn.* 2018;54(3):7401504. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2772293>
11. Tortarolo M., Zysler R.D., Romero H. Magnetic order in amorphous $(Fe_{0.25}Nd_{0.75})_{0.6}B_{0.4}$ nanoparticles. *J. Appl. Phys.* 2009;105(11):113918. <https://doi.org/10.1063/1.3140607>
12. Zysler R.D., De Biasi E., Ramos C.A., Fiorani D., Romero H. Surface and Interparticle Effects in Amorphous Magnetic Nanoparticles. In: Fiorani D. (Ed.). *Surface Effects in Magnetic Nanoparticles*. Springer; 2005. P. 239–261. https://doi.org/10.1007/0-387-26018-8_8
13. Maciaszek R., Kollár P., Birčáková Z., Tkáč M., Füzér J., Olešáková D., Volavka D., Samuely T., Kováč J., Bureš R., Fáberová M. Effects of particle surface modification on magnetic behavior of soft magnetic $Fe@SiO_2$ composites and Fe compacts. *J. Mater. Sci.* 2024;59:11781–11798. <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09881-1>
14. Baskar D., Adler S.B. High temperature Faraday balance for *in situ* measurement of magnetization in transition metal oxides. *Rev. Sci. Instrum.* 2007;78(2):023908. <https://doi.org/10.1063/1.2432476>
15. Moze O., Giovanelli L., Kockelmann W., de Groot C.H., de Boer F.R., Buschow K.H.J. Structure and magnetic properties of $Nd_2Co_{17-x}Ga_x$ compounds studied by magnetic measurements and neutron diffraction. *J. Magn. Magn. Mater.* 1998;189:329–334. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(98\)00291-1](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(98)00291-1)

16. Gaucherand F., Beaunon E. Magnetic texturing in ferromagnetic cobalt alloys. *Physica B: Cond. Matt.* 2004;346–347: 262–266. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2004.01.062>
17. Caignaert V., Maignan A., Pralong V., Hébert S., Pelloquin D. A cobaltite with a room temperature electrical and magnetic transition: YBaCo_4O_7 . *Solid State Sci.* 2006;8(10):1160–1163. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2006.05.004>
18. Zhang C.P., Chaud X., Beaunon E., Zhou L. Crystalline phase transition information induced by high temperature susceptibility transformations in bulk PMP-YBCO superconductor growth *in-situ*. *Physica C*. 2015;508:25–30. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2014.11.002>
19. Bombik A., Leśniewska B., Pacyna A.W. Magnetic susceptibility of powder and single-crystal TmFeO_3 orthoferrite. *J. Magn. Magn. Mater.* 2000;214(3):243–250. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(00\)00049-4](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(00)00049-4)
20. Kobayashi H., Tabuchi M., Shikano M., Kageyama H., Kanno R. Structure, and magnetic and electrochemical properties of layered oxides, Li_2IrO_3 . *J. Mater. Chem.* 2003;13(4):957–962. <https://doi.org/10.1039/b207282c>
21. Seidov Z., Krug von Nidda H.-A., Hemberger J., Loidl A., Sultanov G., Kerimova E., Panfilov A. Magnetic susceptibility and ESR study of the covalent-chain antiferromagnets TlFeS_2 and TlFeSe_2 . *Phys. Rev. B*. 2001;65:014433. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.014433>
22. Slobinsky D., Borzi R.A., Mackenzie A.P., Grigera S.A. Fast sweep-rate plastic Faraday force magnetometer with simultaneous sample temperature measurement. *Rev. Sci. Instrum.* 2012;83(12):125104. <https://doi.org/10.1063/1.4769049>
23. Gopalakrishnan R., Barathan S., Govindarajan D. Magnetic susceptibility measurements on fly ash admixed cement hydrated with groundwater and seawater. *Am. J. Mater. Sci.* 2012;2(1):32–36. <https://doi.org/10.5923/j.materials.20120201.06>
24. Mexner W., Heinemann K. An improved method for relaxation measurements using a Faraday balance. *Rev. Sci. Instrum.* 1993;64(11):3336–3337. <https://doi.org/10.1063/1.1144303>
25. Riminucci A., Uhlarz M., De Santis R., Herrmannsdörfer T. Analytical balance-based Faraday magnetometer. *J. App. Phys.* 2017;121(9):094701. <https://doi.org/10.1063/1.4977719>
26. 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. *Russ. Technol. J.* 2017;5(2):57–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-2-57-69>
27. 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: пат. 2737609 РФ. Заявка № 2020121691; заявл. 30.06.2020; опубл. 01.12.2020. Бюл. 34.
28. Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Ершова В.А., Сандуляк Д.А. Способ магнитно-реологического контроля магнитной восприимчивости частицы: пат. 2753159 РФ. Заявка № 2020143220; заявл. 27.12.2020; опубл. 12.08.2021. Бюл. 23.
29. Сандуляк А.В., Сандуляк А.А., Полисмакова М.Н., Киселев Д.О., Сандуляк Д.А. Магнетометр Фарадея с полюсными наконечниками-полусферами: идентификация зоны стабильного силового фактора. *Russ. Technol. J.* 2017;5(6):43–54. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-6-43-54>
30. Sandulyak A.V., Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Ershova V.A. The approach to the creation and identification of the positioning zone of the sample in the Faraday magnetometer. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;469:665–673. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.06.068>
31. Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Dwivedi A.P., Doumanidis C.C., Sandulyak A.V., Ershova V.A. Magnetic Field Between Polar Hemispheres: Remarks on the Dislocation of Zones of a Constant Gradient and Force Factor. *Nanotechnol. Percept.* 2023;19(3):67–79.
32. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Ershova V.A., Pamme N. Faraday Magnetometer with Polar Hemispheres: Stability Zones for Measuring of Magnetic Susceptibility of Particles. *Mater. Today: Proc.* 2022;59(3):933–940. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.015>

REFERENCES

1. Mosleh N., Insinga A.R., Bahl C.R.H., Bjørk R. The magnetic properties of packings of cylinders. *J. Magn. Magn. Mater.* 2024;607(3):172391. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.172391>
2. Uestuener K., Katter M., Rodewald W. Dependence of the mean grain size and coercivity of sintered Nd–Fe–B magnets on the initial powder particle size. *IEEE Trans. Magn.* 2006;42(10):2897–2899. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.879889>
3. Anhalt M., Weidenfeller B. Magnetic properties of polymer bonded soft magnetic particles for various filler fractions. *J. App. Phys.* 2007;101(2):023907. <https://doi.org/10.1063/1.2424395>
4. Schäfer K., Braun T., Riegg S., Musekamp J., Gutfleisch O. Polymer-bonded magnets produced by laser powder bed fusion: Influence of powder morphology, filler fraction and energy input on the magnetic and mechanical properties. *Mater. Res. Bull.* 2023;158(3):112051. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2022.112051>
5. McFarlane J., Weber C., Wiechert A., Yiacoumi S., Tsouris C. High-gradient magnetic separation of colloidal uranium oxide particles from soil components in aqueous suspensions. *Colloids and Surfaces C: Environmental Aspects.* 2024;2:100023. <https://doi.org/10.1016/j.colsuc.2023.100023>
6. Zhivulko A.M., Yanushkevich K.I., Danilenko E.G., Zelenov F.V., Bandurina O.N. Magnetic properties of $\text{Mn}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Se}$ solid solutions. *Sibirskii aerokosmicheskii zhurnal = Siberian Aerospace Journal.* 2022;23(4):748–755 (in Russ.). <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2022-23-4-748-755>
7. Normile P.S., Andersson M.S., Mathieu R., Lee S.S., Singh G., De Toro J.A. Demagnetization effects in dense nanoparticle assemblies. *Appl. Phys. Lett.* 2016;109(15):152404. <https://doi.org/10.1063/1.4964517>

8. Bjørk R., Zhou Z. The demagnetization factor for randomly packed spheroidal particles. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;476: 417–422. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.01.005>
9. Walmsley N.S., Chantrell R.W., Gore J.G., Maylin M. Experimental and computational investigation of the magnetic susceptibility of composite soft materials. *J. Phys. D: App. Phys.* 2000;33(7):784–790. <http://doi.org/10.1088/0022-3727/33/7/306>
10. Gao Y., Fujiki T., Dozono H., Muramatsu K., Guan W., Yuan J., Tian C., Chen B. Modeling of Magnetic Characteristics of Soft Magnetic Composite Using Magnetic Field Analysis. *IEEE Trans. Magn.* 2018;54(3):7401504. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2772293>
11. Tortarolo M., Zysler R.D., Romero H. Magnetic order in amorphous $(\text{Fe}_{0.25}\text{Nd}_{0.75})_{0.6}\text{B}_{0.4}$ nanoparticles. *J. Appl. Phys.* 2009;105(11):113918. <https://doi.org/10.1063/1.3140607>
12. Zysler R.D., De Biasi E., Ramos C.A., Fiorani D., Romero H. Surface and Interparticle Effects in Amorphous Magnetic Nanoparticles. In: Fiorani D. (Ed.). *Surface Effects in Magnetic Nanoparticles*. Springer; 2005. P. 239–261. https://doi.org/10.1007/0-387-26018-8_8
13. Maciaszek R., Kollár P., Birčáková Z., Tkáč M., Füzér J., Olešáková D., Volavka D., Samuely T., Kováč J., Bureš R., Fáberová M. Effects of particle surface modification on magnetic behavior of soft magnetic Fe@SiO_2 composites and Fe compacts. *J. Mater. Sci.* 2024;59:11781–11798. <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09881-1>
14. Baskar D., Adler S.B. High temperature Faraday balance for *in situ* measurement of magnetization in transition metal oxides. *Rev. Sci. Instrum.* 2007;78(2):023908. <https://doi.org/10.1063/1.2432476>
15. Moze O., Giovanelli L., Kockelmann W., de Groot C.H., de Boer F.R., Buschow K.H.J. Structure and magnetic properties of $\text{Nd}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ga}_x$ compounds studied by magnetic measurements and neutron diffraction. *J. Magn. Magn. Mater.* 1998;189: 329–334. [https://doi.org/10.1016/s0304-8853\(98\)00291-1](https://doi.org/10.1016/s0304-8853(98)00291-1)
16. Gaucherand F., Beaunon E. Magnetic texturing in ferromagnetic cobalt alloys. *Physica B: Cond. Matt.* 2004;346–347: 262–266. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2004.01.062>
17. Caignaert V., Maignan A., Pralong V., Hébert S., Pelloquin D. A cobaltite with a room temperature electrical and magnetic transition: YBaCo_4O_7 . *Solid State Sci.* 2006;8(10):1160–1163. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2006.05.004>
18. Zhang C.P., Chaud X., Beaunon E., Zhou L. Crystalline phase transition information induced by high temperature susceptibility transformations in bulk PMP-YBCO superconductor growth *in-situ*. *Physica C.* 2015;508:25–30. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2014.11.002>
19. Bombik A., Leśniewska B., Pacyna A.W. Magnetic susceptibility of powder and single-crystal TmFeO_3 orthoferrite. *J. Magn. Magn. Mater.* 2000;214(3):243–250. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(00\)00049-4](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(00)00049-4)
20. Kobayashi H., Tabuchi M., Shikano M., Kageyama H., Kanno R. Structure, and magnetic and electrochemical properties of layered oxides, Li_2IrO_3 . *J. Mater. Chem.* 2003;13(4):957–962. <https://doi.org/10.1039/b207282c>
21. Seidov Z., Krug von Nidda H.-A., Hemberger J., Loidl A., Sultanov G., Kerimova E., Panfilov A. Magnetic susceptibility and ESR study of the covalent-chain antiferromagnets TlFeS_2 and TlFeSe_2 . *Phys. Rev. B.* 2001;65:014433. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.014433>
22. Slobinsky D., Borzi R.A., Mackenzie A.P., Grigera S.A. Fast sweep-rate plastic Faraday force magnetometer with simultaneous sample temperature measurement. *Rev. Sci. Instrum.* 2012;83(12):125104. <https://doi.org/10.1063/1.4769049>
23. Gopalakrishnan R., Barathan S., Govindarajan D. Magnetic susceptibility measurements on fly ash admixed cement hydrated with groundwater and seawater. *Am. J. Mater. Sci.* 2012;2(1):32–36. <https://doi.org/10.5923/j.materials.20120201.06>
24. Mexner W., Heinemann K. An improved method for relaxation measurements using a Faraday balance. *Rev. Sci. Instrum.* 1993;64(11):3336–3337. <https://doi.org/10.1063/1.1144303>
25. Riminucci A., Uhlarz M., De Santis R., Herrmannsdörfer T. Analytical balance-based Faraday magnetometer. *J. App. Phys.* 2017;121(9):094701. <https://doi.org/10.1063/1.4977719>
26. 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. *Russ. Technol. J.* 2017;5(2):57–69 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-2-57-69>
27. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Kiselev D.O. *Device for Creation and Diagnostics of Stable Magnetic Field Inhomogeneity Zone*: Pat. RU 2737609 Publ. 01.12.2020 (in Russ.).
28. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Ershova V.A., Sandulyak D.A. *Method for Magnetic-Reological Control of Magnetic Susceptibility of Particle*: Pat. RU 2753159. Publ. 12.08.2021 (in Russ.).
29. Sandulyak A.V., Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Kiselev D.O., Sandulyak D.A. Faraday magnetometer with spheric pole pieces: identification zone with a stable force factor. *Russ. Technol. J.* 2017;5(6):43–54 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-6-43-54>
30. Sandulyak A.V., Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Ershova V.A. The approach to the creation and identification of the positioning zone of the sample in the Faraday magnetometer. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;469:665–673. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.06.068>
31. Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Dwivedi A.P., Dumanidis C.C., Sandulyak A.V., Ershova V.A. Magnetic Field Between Polar Hemispheres: Remarks on the Dislocation of Zones of a Constant Gradient and Force Factor. *Nanotechnol. Percept.* 2023;19(3):67–79.
32. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Ershova V.A., Pamme N. Faraday Magnetometer with Polar Hemispheres: Stability Zones for Measuring of Magnetic Susceptibility of Particles. *Mater. Today: Proc.* 2022;59(3):933–940. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.015>

Об авторах

Полирмакова Мария Николаевна, к.т.н., доцент, кафедра «Приборы и информационно-измерительные системы», Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: polismakova@mirea.ru. Scopus Author ID 36621096600, ResearcherID O-8796-2017, SPIN-код РИНЦ 3845-8391, <https://orcid.org/0000-0002-4564-6206>

Сандуляк Дарья Александровна, к.т.н., доцент, кафедра «Приборы и информационно-измерительные системы», Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sandulyak_d@mirea.ru. Scopus Author ID 36621369400, ResearcherID L-9814-2016, SPIN-код РИНЦ 8114-8109, <https://orcid.org/0000-0003-4269-6133>

Харин Алексей Сергеевич, преподаватель-исследователь, инженер лаборатории магнитного контроля и разделения материалов, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: linnetdar@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 8435-3232, <https://orcid.org/0000-0002-0922-1366>

Головченко Дарья Андреевна, преподаватель-исследователь, стажер-исследователь лаборатории магнитного контроля и разделения материалов, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: golovchenko@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 4303-1093, <https://orcid.org/0000-0002-6227-6884>

Сандуляк Анна Александровна, д.т.н., профессор, кафедра «Приборы и информационно-измерительные системы», Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sandulyak_a@mirea.ru. Scopus Author ID 7004032043, ResearcherID S-5187-2017, SPIN-код РИНЦ 8858-1720, <https://orcid.org/0000-0002-5111-6092>

Сандуляк Александр Васильевич, д.т.н., профессор, кафедра «Приборы и информационно-измерительные системы», Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sandulyak@mirea.ru. Scopus Author ID 57194504434, ResearcherID V-6094-2018, SPIN-код РИНЦ 3795-5374, <https://orcid.org/0000-0001-7605-2702>

Haci Mehmet Baskonus, Professor, Department of Mathematics and Science Education, Faculty of Education, Harran University (Sanliurfa, 63190 Turkey). E-mail: hmbaskonus@gmail.com. Scopus Author ID 36835781300, ResearcherID H-4335-2019, <https://orcid.org/0000-0003-4085-3625>

About the Authors

Maria N. Polismakova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Devices and Information-Measuring Systems, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: polismakova@mirea.ru. Scopus Author ID 36621096600, ResearcherID O-8796-2017, RSCI SPIN-code 3845-8391, <https://orcid.org/0000-0002-4564-6206>

Daria A. Sandulyak, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Devices and Information-Measuring Systems, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sandulyak_d@mirea.ru. Scopus Author ID 36621369400, ResearcherID L-9814-2016, RSCI SPIN-code 8114-8109, <https://orcid.org/0000-0003-4269-6133>

Alexey S. Kharin, Engineer, Laboratory of Magnetic Control and Material's Separation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: linnetdar@mail.ru. RSCI SPIN-code 8435-3232, <https://orcid.org/0000-0002-0922-1366>

Daria A. Golovchenko, Researcher Intern, Laboratory of Magnetic Control and Material's Separation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: golovchenko@mirea.ru. RSCI SPIN-code 4303-1093, <https://orcid.org/0000-0002-6227-6884>

Anna A. Sandulyak, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Devices and Information-Measuring Systems, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sandulyak_a@mirea.ru. Scopus Author ID 7004032043, ResearcherID S-5187-2017, RSCI SPIN-code 8858-1720, <https://orcid.org/0000-0002-5111-6092>

Alexander V. Sandulyak, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Devices and Information-Measuring Systems, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sandulyak@mirea.ru. Scopus Author ID 57194504434, ResearcherID V-6094-2018, RSCI SPIN-code 3795-5374, <https://orcid.org/0000-0001-7605-2702>

Haci Mehmet Baskonus, Professor, Department of Mathematics and Science Education, Faculty of Education, Harran University (Sanliurfa, 63190 Turkey). E-mail: hmbaskonus@gmail.com. Scopus Author ID 36835781300, ResearcherID H-4335-2019, <https://orcid.org/0000-0003-4085-3625>