

УДК 550.380.8

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-6-95-103>

EDN JCFXYH



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

О рабочей зоне измерительного устройства при использовании в нем противостоящих полюсов с плоскими поверхностями

Д.А. Сандуляк[®], М.Н. Полисмакова, Д.А. Головченко, А.С. Харин,
А.В. Сандуляк, А.А. Сандуляк

МИРЭА – Российский технологический университет, Россия, 119454 Москва

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

• Поступила: 29.01.2025 • Доработана: 31.05.2025 • Принята к опубликованию: 06.10.2025

Резюме

Цели. Цель работы – восполнить пробел, касающийся подхода к оценке рабочей (локальной) зоны в измерительных устройствах – магнитометрах-электромагнитах, предназначенных для контроля магнитных свойств образцов с обеспечением в данной зоне условия однородности магнитного поля: постоянства напряженности поля или индукции.

Методы. В основе методологии достижения поставленной цели – экспериментальное получение координатных характеристик напряженности (индукции) поля между полюсами и идентификация искомой рабочей зоны (в окрестности экстремума, фактически – минимума каждой из таких характеристик) с учетом расстояния b между полюсами и их диаметра D .

Результаты. Приведены экспериментально аргументированные данные о рабочих зонах между противостоящими плоскими полюсами для разных величин b и D . Так, при повышенных отношениях $b/D = 0.7–1.3$ размер рабочей зоны, сосредоточенной в срединной приосевой части межполюсной области, оценивается величиной, не превышающей 25–30% от расстояния b . Тогда характерный продольный размер образца со сравнительно малыми поперечными размерами (при размещении образца в такой зоне) не должен превышать 5–10 мм. С увеличением диаметра D и уменьшением отношения b/D рабочая зона увеличивается. В частности, при $b/D \approx 0.5$ размер рабочей зоны оценивается величиной до 90% и даже 100% от расстояния b .

Выводы. Показан и реализован принципиальный подход к оценке рабочей (приосевой) зоны между противостоящими плоскими полюсами посредством получения и анализа необходимых для этого координатных (экстремальных по виду, существенно зависящих от расстояния между полюсами и их диаметра) характеристик напряженности (индукции) поля между ними.

Ключевые слова: однородное магнитное поле, магнитометр-электромагнит, напряженность, индукция, плоские полюсные наконечники

Для цитирования: Сандуляк Д.А., Полисмакова М.Н., Головченко Д.А., Харин А.С., Сандуляк А.В., Сандуляк А.А. О рабочей зоне измерительного устройства при использовании в нем противостоящих полюсов с плоскими поверхностями. *Russian Technological Journal*. 2025;13(6):95–103. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-6-95-103>, <https://www.elibrary.ru/JCFXYH>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

On the working zone of a magnetometer-electromagnet measuring device when using opposing pole pieces with flat surfaces

Daria A. Sandulyak[@], Maria N. Polismakova, Daria A. Golovchenko,
Alexey S. Kharin, Alexander V. Sandulyak, Anna A. Sandulyak

MIREA – Russian Technological University, Russian Federation, 119454 Moscow

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

• Submitted: 29.01.2025 • Revised: 31.05.2025 • Accepted: 06.10.2025

Abstract

Objectives. The work set out to develop an approach for assessing the working (local) zone in magnetometer-electromagnet measuring devices designed for controlling the magnetic properties of samples in which the homogeneity of the magnetic field should be observed in terms of constancy of the field strength or induction.

Methods. The coordinate characteristics of the field strength (induction) between pole components were experimentally obtained to identify the desired working zone (in the vicinity of the minimum of each of these characteristics), taking into account the distance b between the poles and their diameter D .

Results. Data on working zones between opposing flat poles are obtained for different values b and D . With increased ratios $b/D = 0.7–1.3$, the size of the working zone concentrated in the middle axial part of the interpolar area is estimated at a value not exceeding 25–30% of the distance b such that the characteristic longitudinal size of the sample does not exceed 5–10 mm. As D increases and b/D decreases, the working area increases. In particular, at $b/D \cong 0.5$, the size of the working area is estimated to be up to 90% and even 100% of the distance b .

Conclusions. A principled approach to the assessment of the working (axial) zone between opposing flat poles is demonstrated by obtaining and analyzing the necessary coordinate (significantly dependent on b and D) characteristics of the field strength (induction) between them.

Keywords: homogeneity of the magnetic field, magnetometer-electromagnet, strength, induction, flat pole pieces

For citation: Sandulyak D.A., Polismakova M.N., Golovchenko D.A., Kharin A.S., Sandulyak A.V., Sandulyak A.A. On the working zone of a magnetometer-electromagnet measuring device when using opposing pole pieces with flat surfaces. *Russian Technological Journal*. 2025;13(6):95–103. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-6-95-103>, <https://www.elibrary.ru/JCFXYH>

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 известное применение получили измерительные устройства, основывающиеся на баллистическом методе измерения многих параметров, в частности, параметров, характеризующих магнитные свойства различных образцов и их материалов. Наряду с использованием этих устройств, где для создания необходимого магнитного поля ключевым органом является соленоид, в рабочую зону которого (т.е. зону однородного магнитного поля) должен помещаться исследуемый образец [1–6], используют также электромагнит, где магнитное поле создается между противостоящими магнитными полюсами, а форма полюсных наконечников выбирается в зависимости от решаемой задачи [7–15].

Для создания необходимого (для изучения именно магнитных свойств образцов) однородного магнитного поля противостоящие поверхности полюсных наконечников (усеченный конус, цилиндрические диски [9] и пр.) должны быть плоскими и взаимно параллельными. При этом надо иметь в виду, что рабочей зоной (в которой соблюдается требуемая однородность поля, т.е. практически постоянство того или иного значения напряженности поля H) здесь является не вся межполюсная область, а только ее срединная часть в зависимости от расстояния b между плоскостями полюсов и их диаметра D , чему, на наш взгляд, не уделяется должного внимания. Если же не учитывать этого, то может оказаться, что при выполнении исследований разные участки изучаемого объекта будут находиться в разных условиях (по H), и тогда результаты измерений будут не вполне корректными. Следовательно, рассматриваемый в данной работе вопрос о рабочей зоне такого измерительного устройства является актуальным и подлежит обязательному обсуждению.

С позиций затронутого вопроса основной характеристикой поля между противостоящими магнитными полюсами (плоскими, разноименными) является координатная характеристика поля: она важна как при эксплуатации устройств (особенно измерительных) подобного типа, так и для создания таких устройств. Это – данные индукции B (или напряженности $H = B/\mu_0$, где μ_0 – магнитная константа) в межполюсной области.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ, ИХ ОБРАБОТКА И ОБСУЖДЕНИЕ

Как следует из сказанного выше, измерительным устройством, заслуживающим внимания (по сути – вариантом магнитометра баллистического типа), является электромагнит, в котором используются противостоящие полюсные наконечники, поверхности

которых, обращенные друг к другу, плоские и взаимно параллельные. Изучаемый образец должен размещаться между полюсными наконечниками, выполненными, в частности, в виде дисков, как показано на рис. 1, именно в рабочей зоне, где создаваемое магнитное поле практически однородно. Между тем, как будет проиллюстрировано ниже, в межполюсной области такого измерительного устройства-магнитометра оговоренное условие может быть обеспечено лишь при сравнительно небольшом расстоянии b между полюсами, причем только в срединной части области между ними (при увеличении b напряженность поля H снижается при приближении к периферии этой части области и возрастает при приближении к полюсам).

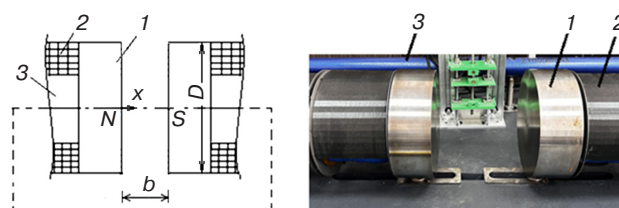


Рис. 1. Схема и общий вид варианта магнитометра баллистического типа – с полюсными наконечниками-дисками:
1 – полюсный наконечник,
2 – катушка намагничивания, 3 – магнитопровод.
 N, S – полюса магнита, x – направление измерения индукции

На рис. 2 в качестве примера показаны полученные с помощью датчика Холла координатные (при удалении x от одного из противостоящих разноименных полюсов по оси межполюсной области) характеристики магнитной индукции B [11]. При их получении использовались плоские магнитные элементы Nd–Fe–B диаметром $D = 25$ мм и толщиной 10 мм (для иллюстрации характеристик наподобие рис. 2 достаточно экспериментально получить одну из симметричных ветвей любой из них [11]), значения b (повышенные по сравнению с D) составили $b = 18–33$ мм ($b/D = 0.7–1.3$).

Данные рис. 2 свидетельствуют, что рабочая (исполнительная для исследования того или иного образца) зона здесь – это срединная зона в окрестности экстремума (минимума) кривой B от x ; по протяженности она может быть оценена величиной не более чем 25–30% от значения b . Для исследователя такой результат означает, что размер изучаемого образца при размещении его в такой зоне не должен превышать всего лишь 5–10 мм, к тому же это справедливо лишь для образцов сравнительно малых поперечных размеров.

Увеличить протяженность рабочей зоны и добиться однородности поля в ней можно за счет увеличения диаметра D полюсов (полюсных наконечников

в виде дисков) и/или уменьшения расстояния b между ними.

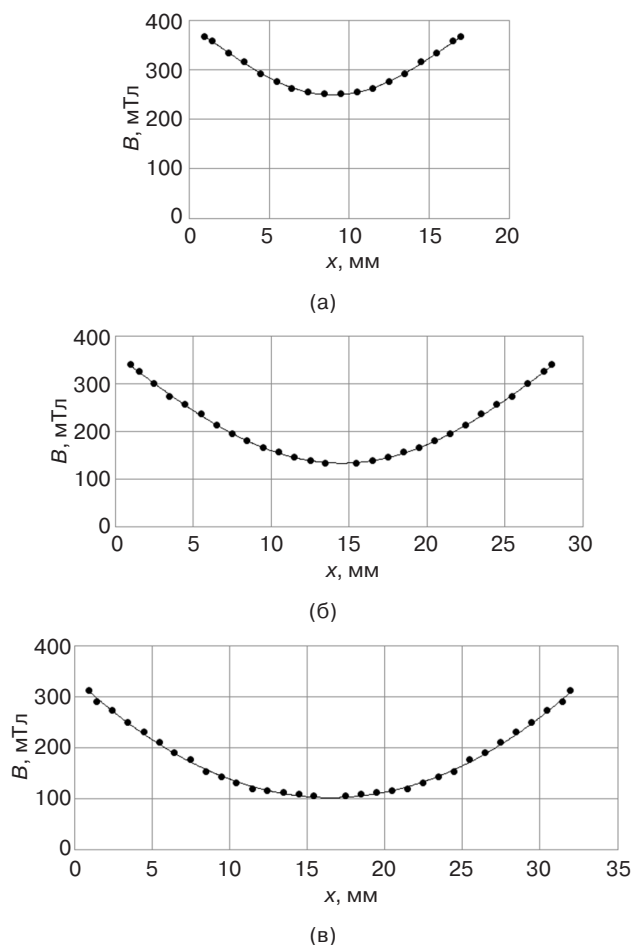


Рис. 2. Координатные характеристики индукции B магнитного поля между противостоящими полюсами диаметром $D = 25$ мм (для приосевой части межполюсной области) при разных расстояниях b между ними: (а) 18 мм, (б) 29 мм, (в) 33 мм

На рис. 3 показаны координатные характеристики индукции B между полюсами диаметром $D = 200$ мм, удаленными друг от друга на расстояние $b = 102$ мм ($b/D \cong 0.5$), причем соответствующие зависимости приведены как для приосевой части межполюсной области, так и для других частей этой области – на разных расстояниях от оси: $0.15D$, $0.3D$, $0.38D$ и практически на периферии этой области, а именно $0.45D$.

Видно, что в данном случае рабочей зоной можно считать практически всю межполюсную приосевую область; причем поперечным (по отношению к оси) радиусом не более $0.15D$. Здесь протяженность рабочей зоны, оцениваемая величиной 90–100% от b (для приосевой части межполюсной области), допускает даже стыковку торцов изучаемого образца с полюсными поверхностями, но только (это надо учитывать обязательно) при изучении образцов сравнительно малых поперечных размеров.

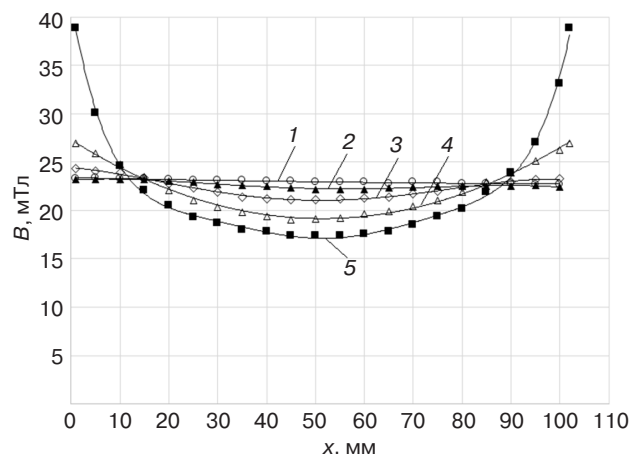


Рис. 3. Координатные характеристики индукции B магнитного поля между противостоящими полюсами диаметром $D = 200$ мм (например, в электромагнитной системе согласно рис. 1) при расстоянии $b = 102$ мм между ними: 1 (○) – данные для приосевой части межполюсной области, 2 (▲), 3 (◊), 4 (Δ) и 5 (■) – данные для участков, отстоящих от оси соответственно на удалении $0.15D$, $0.3D$, $0.38D$ и $0.45D$

Вместе с тем, надо также иметь в виду, что при увеличении диаметра D полюсов и уменьшении расстояния b между ними, хотя и решается вопрос создания необходимой рабочей зоны (с обеспечением практически однородного магнитного поля), одновременно ограничивается возможность использования такой рабочей зоны для проведения в ней исследований сравнительно продолговатых образцов.

В связи с тем, что первостепенной координатной характеристикой в подобных электромагнитных системах является характеристика в осевом направлении межполюсной области, где силовые линии индукции не искривляются, уместным может стать вопрос о возможности получения таких характеристик приемом суперпозиции. Необходимо лишь обладать соответствующей координатной характеристикой индукции B со стороны одного полюса в отсутствии противостоящего разноименного магнитного полюса, имеющего зеркальную характеристику, условно предполагаемого на определенном расстоянии.

На рис. 4 показана координатная характеристика индукции поля со стороны одного магнитного полюса указанного магнитного элемента [11]. Видно, что по мере удаления x от центра его полюсной поверхности индукция поля B монотонно убывает, подчиняясь, как установлено в [11], зависимости, близкой к экспоненциальной.

Оперируя этой характеристикой, в т.ч. ее «зеркальным отражением» – симметричным на удалении, равным тому или иному межполюсному расстоянию b (размеру межполюсной области), можно тем самым найти результирующую характеристику индукции сложением соответствующих значений

индукции в направлении оси (здесь – между фактическим и фиктивным полюсами), т.е. прибегнуть к приему суперпозиции.

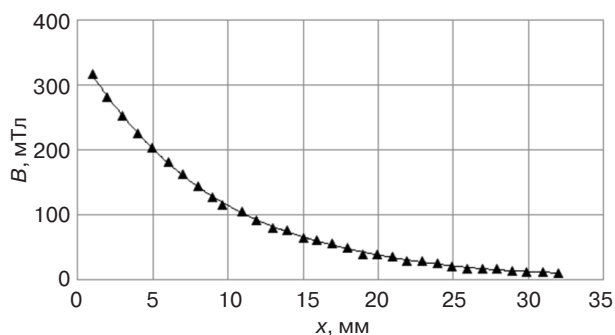
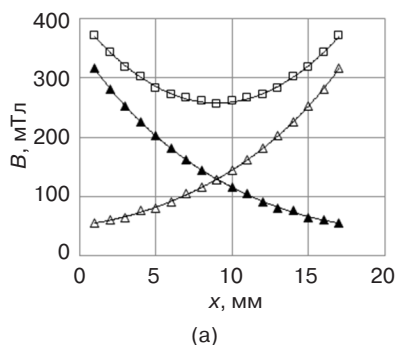
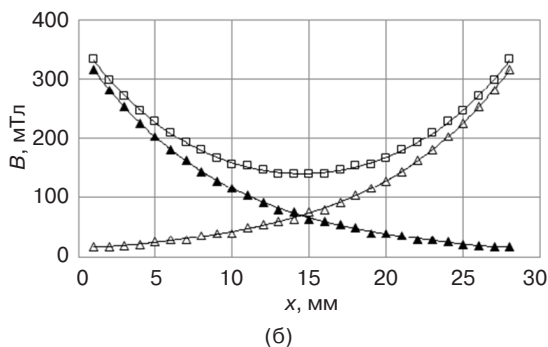


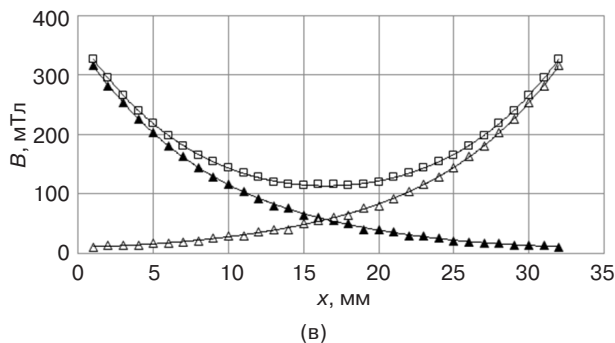
Рис. 4. Координатная характеристика индукции B поля со стороны одного полюса магнитного элемента-диска при удалении от центра полюсной поверхности



(а)



(б)



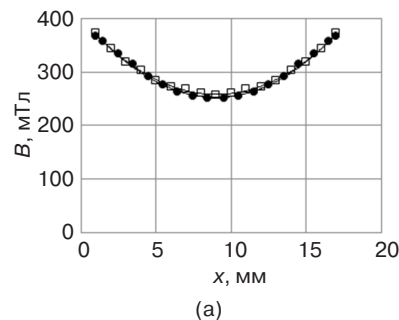
(в)

Рис. 5. Результаты суперпозиции данных индукции B (□) между фактическим (данные B помечены точками ▲) и условно противостоящим на расстоянии b (данные B помечены точками Δ) магнитными полюсами элементов-дисков:
(а) $b = 18$ мм, (б) $b = 29$ мм, (в) $b = 33$ мм

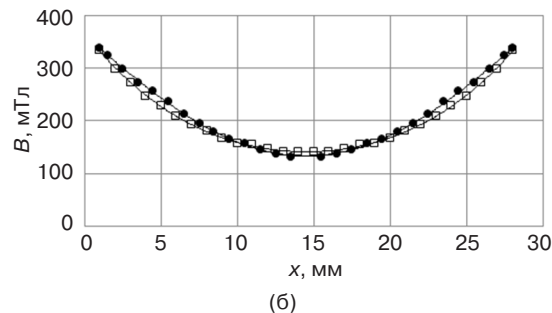
На рис. 5 показаны результаты такого метода с получением соответствующих результирующих (точки □) координатных характеристик индукции B [11] для разных значений (фиктивных) межполюсного расстояния b .

На рис. 6 сведены фактические данные индукции B , полученные между противостоящими (разноименными) магнитными полюсами, с данными индукции B , полученными суперпозицией.

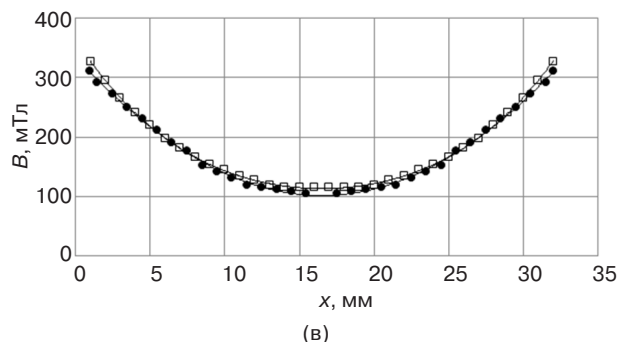
Из рис. 6 видно, что сопоставляемые координатные характеристики B хорошо согласуются между собой. Это свидетельствует о возможности применения принципа суперпозиции к данной задаче, а значит – о возможности универсального решения вопроса получения координатных (напомним – при осевых) характеристик индукции поля в той или иной (не обязательно указанной выше) системе двух



(а)



(б)



(в)

Рис. 6. Сравнение фактической координатной характеристики данных индукции между двумя противостоящими полюсами, разнесенными на расстояние b (точки ● из рис. 2) с соответствующей характеристикой, полученной суперпозицией данных индукции каждого из этих магнитных полюсов (точки □ из рис. 5):
(а) $b = 18$ мм, (б) $b = 29$ мм, (в) $b = 33$ мм

противостоящих полюсов с плоскими поверхностями. При этом стоит заметить, что можно отказаться от предварительных (перед компоновкой той или иной магнитной системы, в т.ч. используемой в соответствующих измерительных устройствах) замеров индукции, а пользоваться только одной координатной характеристикой – со стороны одного магнитного полюса. Это указывает на возможность практического использования принципа суперпозиции при создании подобных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе обозначена востребованность оценки размеров рабочей зоны (где значения напряженности поля H или индукции B практически постоянны) между противостоящими плоскими полюсами, от чего зависит достоверность определения магнитных свойств образцов, размещаемых в данной зоне. Так, может оказаться, что при выполнении исследований разные части изучаемого образца будут находиться в разных условиях (по H или B), а значит, к результатам таких измерений следует относиться как к не вполне корректным.

В работе приводятся экспериментально аргументированные данные о рабочих зонах, когда противостоящие магнитные полюса являются плоскими, в виде дисков, для разных расстояний b между плоскостями полюсов и разных диаметров D . Установлено, что при повышенных относительно D значениях b размер рабочей зоны не будет превышать 25–30% от b , а значит, размещаемый в этой зоне образец для исследований не должен превышать 5–10 мм (к тому же со сравнительно малым поперечным размером).

Показано, что с увеличением диаметра D (и насколько возможным уменьшением расстояния b) рабочая зона увеличивается. В частности, при $b = 102$ мм и $D = 200$ мм (т.е. при $b/D \cong 0.5$) размер рабочей зоны оценивается величиной, начиная с 90% и до 100% от b для приосевой части межполюсной области, т.е. вплоть до допускаемой стыковки торцов изучаемого образца с полюсными поверхностями, но только при изучении образцов сравнительно малых поперечных размеров.

Демонстрируется возможность оценки рабочей (приосевой) зоны между противостоящими плоскими магнитными полюсами получением необходимых для этого координатных характеристик индукции (напряженности) поля между ними приемом суперпозиции (с использованием соответствующих координатных характеристик со стороны одного из магнитных полюсов).

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

Д.А. Сандуляк – методология, верификация и анализ данных, написание рукописи и ее редактирование.

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

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

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

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

А.А. Сандуляк – методология, редактирование рукописи.

Authors' contributions

D.A. Sandulyak – methodology, data verification and analysis, writing and editing the text of the article.

M.N. Polismakova – conceptualization, conducting the research, writing and editing the text of the article.

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

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

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

A.A. Sandulyak – methodology, editing.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Колесов К.А., Маширов А.В., Коледов В.В., Петров А.О., Орлов А.П., Бычков И.В., Кузьмин Д.А., Gaida D., Кошкидько Ю.С., Шавров В.Г., Суслов Д.А. Соленоид на основе лент высокотемпературного сверхпроводника для магнитокалорических применений. *Журнал радиоэлектроники*. 2024;11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.31>
- Франц В.Г. Сверхпроводящий соленоид из ВТСП ленты второго поколения. В сб.: *Гагаринские чтения – 2022: Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции XLVIII Гагаринские чтения 2022*. М.: 2022. С. 310. <https://www.elibrary.ru/zlbgea>

3. Chen D.X., Pardo E., Zhu Y.-H., Xiang L.-X., Ding J.-Q. Demagnetizing correction in fluxmetric measurements of magnetization curves and hysteresis loops of ferromagnetic cylinders. *J. Magn. Magn. Mater.* 2018;449:447–454. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.10.069>
4. Сандуляк Д.А., Сандуляк А.А., Горпиненко Ю.О., Сандуляк А.В., Соловьев И.А. Модель «трубок-слоев» намагничиваемой цепочки шаров: магнитные свойства, оценка гиперусиления поля между шарами. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2023;3(144):49–61. <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-3-49-61>
5. Цицикян Г.Н., Антипов М.Ю. Расчет индуктивности однослойного и двухслойного соленоида с учетом особенностей практического применения. *Электричество*. 2019;10:48–53. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2019-10-48-53>
6. Капица П.Л., Филимонов С.И. Соленоид, создающий магнитное поле до 30 кЭ в объеме 5 л и потребляющий 500 кВт. *УФН*. 1968;95(1):35–43. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0095.196805d.0035>
7. Чечерников В.И. *Магнитные измерения*. М.: МГУ; 1963. 286 с.
8. Thirumurugan A., Ramadoss A., Dhanabalan S., et al. MXene/Ferrite Magnetic Nanocomposites for Electrochemical Supercapacitor Applications. *Micromachines (Basel)*. 2022;13(10):1792. <https://doi.org/10.3390/mi13101792>
9. Lopez-Dominguez V., Quesada A., Guzmán-Mínguez J.C., Moreno L., Lere M., Spottorno J., Giacomone F., Fernández J.F., Hernando A., García M.A. A simple vibrating sample magnetometer for macroscopic samples. *Rev. Sci. Instrum.* 2018;89(3):034707. <https://doi.org/10.1063/1.5017708>
10. Li W., Cai H., Kang Y., Ying Y., Yu J., Zheng J., Qiao L., Che S. High permeability and low loss bioinspired soft magnetic composites with nacre-like structure for high frequency applications. *Acta Materialia*. 2019;167:267–274. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.01.035>
11. Сандуляк А.А., Ершов Д.В., Орешкин Д.В., Сандуляк А.В. Характеристики индукции поля в модуле магнитного сепаратора. *Вестник МГСУ*. 2013;5:103–111. <https://www.elibrary.ru/olirce>
12. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. *Однокатушечный электромагнит*: пат. 2791925 РФ. Заявка № 2022115710; заявл. 10.06.2022; опубл. 14.03.2023. Бюл. № 8.
13. Амосков В.М., Знаменщикова Н.С., Кухтин В.П., Капаркова М.В., Крылова Н.А., Ламзин Е.А., Ларионов М.С., Мельников Д.Д. *Способ обеспечения однородности магнитного поля в рабочей области явнополюсного магниторезонансного устройства*: пат. 2833238 РФ. Заявка № 2023126377; заявл. 15.10.2023; опубл. 15.01.2025. Бюл. № 2.
14. 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>
15. Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Полисмакова М.Н., Киселев Д.О., Ершова В.А., Сандуляк Д.А. Использование полюсных наконечников сферической формы для реализации метода Фарадея. *Приборы и техника эксперимента*. 2018;1:109–112. <https://doi.org/10.7868/S0032816218010342>

REFERENCES

1. Kolesov K.A., Mashirov A.V., Koledov V.V., et al. Solenoid based on tapes of high-temperature superconductor for magnetocaloric applications. *Zhurnal radioelektroniki = J. Radio Electronics*. 2024;11 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.31>
2. Franz V.G. Superconducting solenoid from the second-generation HTSC tape. In: *Gagarin Readings – 2022: Collection of Abstracts of the Works of the International Youth Scientific Conference 48th Gagarin Readings 2022*. Moscow: 2022. P. 310 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/zlbgea>
3. Chen D.X., Pardo E., Zhu Y.-H., Xiang L.-X., Ding J.-Q. Demagnetizing correction in fluxmetric measurements of magnetization curves and hysteresis loops of ferromagnetic cylinders. *J. Magn. Magn. Mater.* 2018;449:447–454. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.10.069>
4. Sandulyak D.A., Sandulyak A.A., Gorpinenko Yu.O., et al. “Pipe-layer” model of the magnetized chain of spheres: magnetic properties and assessment of the hyper-amplification field between the spheres. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Priborostroyeniye = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*. 2023;3(144): 49–61 (in Russ.). <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-3-49-61>
5. Tsitsikyan G.N., Antipov M.Yu. Calculating the Inductance of Single- and Two-Layer Solenoids Taking into Account the Specific Features of Their Practical Application. *Elektrichestvo*. 2019;10:48–53 (in Russ.). <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2019-10-48-53>
6. Kapitza P.L., Filimonov S.I. Solenoid producing a magnetic field up to 30 kOe in a volume of 5 liters and consuming 500 kW. *Sov. Phys. Usp.* 1968;11(3):299–303. <https://doi.org/10.1070/PU1968v011n03ABEH003833> [Original Russian Text: Kapitza P.L., Filimonov S.I. Solenoid producing a magnetic field up to 30 kOe in a volume of 5 liters and consuming 500 kW. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1968;95(1):35–43 (in Russ.). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0095.196805d.0035>]
7. Chechernikov V.I. *Magnitnye izmereniya (Magnetic Measurements)*. Moscow: Moscow State University; 1963. 286 p. (in Russ.).
8. Thirumurugan A., Ramadoss A., Dhanabalan S., et al. MXene/Ferrite Magnetic Nanocomposites for Electrochemical Supercapacitor Applications. *Micromachines (Basel)*. 2022;13(10):1792. <https://doi.org/10.3390/mi13101792>

9. Lopez-Dominguez V., Quesada A., Guzmán-Mínguez J.C., Moreno L., Lere M., Spottorno J., Giacomone F., Fernández J.F., Hernando A., García M.A. A simple vibrating sample magnetometer for macroscopic samples. *Rev. Sci. Instrum.* 2018;89(3):034707. <https://doi.org/10.1063/1.5017708>
10. Li W., Cai H., Kang Y., Ying Y., Yu J., Zheng J., Qiao L., Che S. High permeability and low loss bioinspired soft magnetic composites with nacre-like structure for high frequency applications. *Acta Materialia*. 2019;167:267–274. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.01.035>
11. Sandulyak A.A., Ershov D.V., Oreshkin D.V., Sandulyak A.V. Characteristics of magnetic field induction inside a module of a magnetic separator. *Vestnik MGSU*. 2013;5:103–111 (in Russ.).
12. Neiman L.A., Neiman V.Yu. *Single Coil Electromagnet*: RF Pat. RU 2791925. Publ. 14.03.2023 (in Russ.).
13. Amoskov V.M., Znamenshchikova N.S., Kukhtin V.P., Kaparkova M.V., Krylova N.A., Lamzin E.A., Larionov M.S., Mel'nikov D.D. *Method for Ensuring Magnetic Field Homogeneity in the Working Region of a Salient-Pole Magnetic Resonance Device*: RF Pat. RU 2833238. Publ. 15.01.2025 (in Russ.).
14. 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>
15. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Polismakova M.N., et al. The Use of Spherical Pole Pieces for Performing the Faraday Balance Method. *Instrum. Exp. Tech.* 2018;61(1):123–126. <https://doi.org/10.1134/S0020441218010293>
[Original Russian Text: 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. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2018;1: 109–112 (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032816218010342>]

Об авторах

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>

Полисмакова 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>

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>

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>

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>

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>

About the Authors

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>

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. 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>

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>

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>

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>