

Определение магнитных характеристик частиц ферропримесей сельхозпродукции как определяющий фактор для ее эффективной магнитной сепарации

МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:
Анна Александровна Сандуляк
E-mail: sandulyak_a@mirea.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Полисмакова М.Н., Сандуляк А.А. (2025). Определение магнитных характеристик частиц ферропримесей сельхозпродукции как определяющий фактор для ее эффективной магнитной сепарации. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(2), 26–36. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.2.642>

ПОСТУПИЛА: 17.09.2024

ПРИНЯТА: 15.06.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.06.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.

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



АННОТАЦИЯ

Введение: Вопрос определения магнитных характеристик частиц малых размеров остается проблемным, а потому может сдерживать решение научных и научно-прикладных задач (в числе важнейших из них – удаление ферропримесей из сельхозпродукции) и требует отдельного рассмотрения, в том числе с привлечением оригинальных подходов и идей.

Цель: На примере ферропримесей, выделенных при производстве измельченного чайного листа и сахара, дать описание метода разреженного образца (разреженного порошка феррочастиц) для получения данных магнитной восприимчивости сначала образца (образцов), а затем – отдельных частиц. Сравнить характеристики этих частиц и частиц магнетита.

Материалы и методы: Получены экспериментальные зависимости магнитной восприимчивости дисперсных образцов от объемной доли магнитоактивных частиц, выделенных из измельченного чайного листа и сахара-песка (а также частиц магнетита – для сравнения). Образцы формировались путём разрежения исходного порошка (содержащего только магнитоактивные частицы) добавлением немагнитного наполнителя, при фиксированной напряженности магнитного поля $H = 45$ кА/м.

Результаты: В ходе проведенного эксперимента были получены количественные зависимости магнитной восприимчивости дисперсных образцов от объемной доли феррочастиц, извлеченных из измельченного чайного листа и сахара-песка; в качестве эталона дополнительно исследовались частицы магнетита. Для всех образцов была зафиксирована область линейной зависимости в начальном диапазоне концентраций, что позволило интерпретировать соответствующие участки как информативные относительно магнитной восприимчивости отдельных частиц.

Выводы: Полученные значения магнитной восприимчивости частиц ферропримесей, извлеченных из чая, сахара и магнетита, существенно различаются, что указывает на неоднородность их магнитных свойств. Эти различия обеспечивают основание для целенаправленного подбора параметров магнитной сепарации в зависимости от характеристик конкретной среды, тем самым повышая эффективность удаления ферропримесей из пищевых и иных дисперсных систем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ферропримеси; дисперсный образец; магнитная восприимчивость; концентрационная зависимость; магнитометр пондеромоторного типа

Determination of Magnetic Properties of Ferrous Impurity Particles in Agricultural Products as a Determinative Factor for its Effective Magnetic Separation

MIREA – Russian technological university, Moscow, Russian Federation

Maria N. Polismakova, Anna A. Sandulyak

CORRESPONDENCE:

Anna A. Sandulyak

E-mail: sandulyak_a@mirea.ru

FOR CITATIONS:

Polismakova M.N., Sandulyak A.A. (2025). Determination of Magnetic Properties of Ferrous Impurity Particles in Agricultural Products as a Determinative Factor for its Effective Magnetic Separation. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(2), 26–36. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.2.642>

RECEIVED: 17.09.2024

ACCEPTED: 15.06.2025

PUBLISHED: 31.06.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FUNDING

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of State Assignment (project No. FSFZ-2024-0005).



ABSTRACT

Introduction: The issue of determining the magnetic characteristics of small particles remains problematic, and therefore can restrain the solution of scientific and scientific-applied problems (among the most important of them is the removal of ferrous impurities from agricultural products) and requires special consideration, including the involvement of original approaches and ideas.

Purpose: Using the samples of ferro impurities isolated during the production of crushed tea leaf and sugar, to provide a description of a sparse sample method (sparse ferroparticle powder) to obtain magnetic susceptibility data of the sample, and further of individual particles; to compare the characteristics of these particles and magnetite particles.

Materials and Methods: Experimental dependencies of the magnetic susceptibility of dispersed samples on the volume fraction of magnetoactive particles extracted from crushed tea leaf and granulated sugar (as well as magnetite particles for comparison) were obtained. The samples were prepared by diluting the original powder (consisting solely of magnetoactive particles) with a non-magnetic filler, under a fixed magnetic field strength of $H = 45$ kA/m.

Results: In the course of the experiment, quantitative dependencies of the magnetic susceptibility of dispersed samples on the volume fraction of ferro-particles extracted from crushed tea leaf and granulated sugar were obtained; magnetite particles were additionally examined as a reference material. For all sample types, a linear region was identified in the initial concentration range, which was interpreted as informative with respect to the magnetic susceptibility of individual particles.

Conclusion: The obtained values of magnetic susceptibility for ferro-impurity particles extracted from tea, sugar, and magnetite differ significantly, indicating heterogeneity in their magnetic properties. These differences provide a basis for the targeted selection of magnetic separation parameters depending on the characteristics of a specific medium, thereby enhancing the efficiency of removing ferro-impurities from food and other dispersed systems.

KEYWORDS

ferro impurities; disperse sample; magnetic susceptibility; concentration dependence; ponderomotive magnetometer

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на широкий спектр современных методов и устройств для измерения магнитных свойств сплошных тел, порошков, композитов и растворов (Putri et al., 2022; Thirumurugan et al., 2022; Lopez-Dominguez et al., 2018; Riminucci et al., 2017; Baskar et al., 2007), задача определения магнитных характеристик частиц малых размеров, особенно в дисперсных средах, остается нерешенной. В частности, существующие методы, разработанные для массивных образцов (Леднев и соавт., 2024; Mosleh et al., 2024; Bjørk et al., 2019; Chen et al., 2018; Алифанов и соавт., 2017), ориентированы на макроскопические измерения и учитывают размагничивающий фактор, но оказываются неприменимыми к индивидуальным микрочастицам.

Проблема особенно остро встает в контексте практико-ориентированных задач, таких как очистка сельхозпродукции от ферропримесей с помощью магнитной сепарации. Магнитные характеристики таких примесей во многом определяют эффективность процессов их удаления. Тем не менее, информация о магнитной восприимчивости (χ) частиц, извлекаемых из реальных продуктов переработки (например, сахара или чайного листа), в большинстве случаев отсутствует или основана на обобщенных данных о типичных железосодержащих соединениях — таких как магнетит Fe_3O_4 или маггемит $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Подобное заимствование характеристик без учёта фазового состава и морфологии может приводить к значительным ошибкам в инженерных расчётах и проектировании оборудования (Sandulyak et al., 2022; Sandulyak et al., 2019; Sandulyak et al., 2017).

Даже при наличии данных о химическом составе ферропримесей, оценка их магнитных свойств зачастую ограничивается качественными выводами. Это связано с тем, что магнитная восприимчивость зависит не только от состава, но и от агрегатного состояния, степени агломерации, а также характеристик среды, в которую помещаются частицы. Методы, применяемые для анализа порошков или коллоидов (Maciaszek et al., 2024; Мусатов и соавт., 2023; Schäfer et al., 2023; Хачатуров и соавт., 2020; Диканский и соавт., 2024; Dikansky et al., 2024), как правило, требуют значительного объема материала и дают усредненные значения, не позволяющие судить о свойствах отдельных частиц.

Таким образом, сохраняется очевидный методологический пробел: отсутствует воспроизводимый и чувствительный способ количественного определения магнитной восприимчивости ферропримесей на уровне отдельных частиц. Этот пробел затрудняет решение как фундаментальных, так и прикладных задач, включая селективную магнитную сепарацию пищевых продуктов, где различие в магнитных свойствах даже в пределах одного вида сырья может оказаться критичным.

Цель настоящего исследования: разработать и апробировать методику количественного определения магнитной восприимчивости отдельных частиц ферропримесей, основанную на концепции разреженного порошкового образца, с последующим ее применением к реальным примесям, выделенным из измельченного чайного листа и сахара. Предлагаемый подход направлен на получение значений χ , репрезентативных для индивидуальных частиц, и их сопоставление с эталонным материалом (магнетитом), что позволит, во-первых, опровергнуть распространенное, но некорректное представление о ферропримесях как гомогенных магнитных образованиях; во-вторых, обеспечить научную основу для рационального выбора параметров магнитных сепараторов в условиях технологической неоднородности реального сырья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Объектами исследования являлись три типа частиц:

- (1) ферропримеси, выделенные из измельченного чайного листа;
- (2) ферропримеси, извлеченные из сахара-песка;
- (3) частицы порошка магнетита (для сопоставления).

Извлечение ферропримесей из пищевых продуктов проводилось в соответствии с требованиями нормативных документов: ГОСТ 1936–85 «Чай. Правила приемки и методы анализа» и ГОСТ 33222–2015 «Сахар. Технические условия». Пробы были представлены перерабатывающими предприятиями: чайной компанией и сахарным заводом.

Оценка гранулометрического состава показала, что эквивалентный диаметр частиц, извлеченных из чайного листа, находится в диапазоне от 0,1 до 1,2 мм; частиц из сахара — от 0,5 до 1,75 мм.

Оборудование

Измерения магнитной восприимчивости проводились на лабораторной установке — магнитометре пондеромоторного типа с полюсными наконечниками в форме полусфер. Установка обеспечивала создание неоднородного магнитного поля с регулируемой напряженностью в диапазоне от 22,5 до 145 кА/м. В данном исследовании использовалось фиксированное значение напряженности поля $H = 45$ кА/м.

Метод определения магнитной восприимчивости

Для оценки магнитной восприимчивости использовался метод, основанный на получении концентрационной зависимости $\langle\chi\rangle$ от γ — объемной доли магнитоактивных частиц в образце. Образцы формировались путем диспергирования ферропримесей с последующим их поэтапным разрежением немагнитным наполнителем (измельченным песком). Таким образом создавалась серия порошковых образцов с различной объемной долей γ .

Применялся пондеромоторный метод измерения, основанный на регистрации силы, действующей на дисперсный образец $\langle\chi\rangle$ в неоднородном магнитном поле. Магнитную восприимчивость $\langle\chi\rangle$ определяли по формуле:

$$\langle\chi\rangle = \frac{F}{\mu_0 V \cdot B \operatorname{grad} B}, \quad (1)$$

где μ_0 — магнитная константа, V — объем образца, B — индукция магнитного поля.

Зависимость $\langle\chi\rangle$ от γ для каждого типа частиц демонстрировала два выраженных участка: начальный линейный ($\gamma \lesssim 0,12$ – $0,15$) и последующий — с нелинейным ростом. Для определения магнитной восприимчивости отдельных частиц анализировался именно начальный линейный участок, в котором магнитные взаимодействия

между частицами минимальны. При этом использовалась линейная зависимость:

$$\chi = \langle\chi\rangle/\gamma. \quad (2)$$

Процедура эксперимента

Для каждого типа ферропримесей было подготовлено по 14 образцов с различными значениями объемной доли γ . Все измерения проводились при фиксированной напряженности поля $H = 45$ кА/м. Каждое значение $\langle\chi\rangle$ получено как среднее из пяти повторных измерений для минимизации инструментальной погрешности. Стандартное отклонение в серии не превышало 5 %.

Обработка данных

Для подтверждения линейного характера зависимости $\langle\chi\rangle$ от γ в области малых концентраций использовалась парная линейная регрессия. Аппроксимация позволила определить производную зависимости $\chi(\gamma)$ и, следовательно, рассчитать магнитную восприимчивость отдельных частиц.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные данные показали, что магнитная $\langle\chi\rangle$ восприимчивость дисперсных образцов систематически зависит от объемной доли магнитоактивных частиц γ . Эта зависимость была исследована для трёх типов порошков: частиц магнетита, ферропримесей измельченного чайного листа и ферропримесей сахара-песка. Все измерения проводились при фиксированной напряженности магнитного поля $H = 45$ кА/м, с пятикратной повторностью на каждую точку. Стандартное отклонение не превышало 5 % от среднего значения.

Анализ Таблицы 1 свидетельствует, что для образцов с частицами магнетита наблюдается наиболее выраженное возрастание $\langle\chi\rangle$ при увеличении γ . В начальной области $\gamma = 0,06$ – $0,15$ зависимость магнитной восприимчивости от объемной доли близка к линейной, что позволяет рассматривать ее как репрезентативную для определения χ отдельных частиц.

Таблица 1
Экспериментальные данные по частицам магнетита
Table 1
Experimental Magnetite Particles Data

Объемная доля, γ	0.31	0.25	0.22	0.20	0.19	0.15	0.15	0.14	0.13	0.13	0.12	0.11	0.09	0.06
Магнитная восприимчивость образца, $\langle\chi\rangle$	0.43	0.34	0.28	0.27	0.24	0.20	0.17	0.16	0.14	0.13	0.13	0.10	0.06	0.04

В Таблице 2, отражающей данные по ферропримесям, выделенным из чайного листа, аналогичная линейная зависимость сохраняется в диапазоне γ до 0,13. Значения $\langle\chi\rangle$ в этом диапазоне уступают значениям для магнетита, что свидетельствует о меньшей магнитной активности этих частиц.

Таблица 3 иллюстрирует поведение образцов с ферропримесями сахара. В данном случае значения $\langle\chi\rangle$ при тех же значениях γ оказываются значительно ниже по сравнению с первыми двумя сериями. При $\gamma \leq 0,12$ зависимость также сохраняет линейный характер, но с существенно меньшим наклоном.

Сопоставительный анализ графиков, представленных на Рисунке 1, позволяет наглядно сравнить характер зависимости от γ для трех типов образцов. Видно, что все три кривые имеют начальный линейный участок, однако угол наклона существенно различается: кривая 1 (магнетит) демонстрирует наибольшую крутизну, кривая 2 (чай) — промежу-

точную, а кривая 3 (сахар) — минимальную. Это различие в наклонах линейных участков напрямую отражает различие в магнитной восприимчивости отдельных частиц, входящих в состав соответствующих систем.

На основании начальных линейных участков кривых ($\gamma \lesssim 0,12-0,15$), определены приближённые значения магнитной восприимчивости χ для отдельных частиц каждого типа:

- (1) для магнетита — $\chi = 1,25$,
- (2) для ферропримесей чайного листа — $\chi = 0,90$,
- (3) для ферропримесей сахара — $\chi = 0,57$.

Систематическое различие в величинах χ между группами подтверждает, что магнитные свойства исследуемых ферропримесей не являются универсальными и зависят от конкретного источника происхождения.

Таблица 2
Экспериментальные данные по ферропримесям чая
Table 2
Experimental Data on Tea Ferro Impurities

Объемная доля, γ	0.33	0.28	0.26	0.25	0.23	0.22	0.20	0.18	0.17	0.16	0.15	0.14	0.13	0.11	0.09	0.08	0.05
Магнитная восприимчивость образца, $\langle\chi\rangle$	0.31	0.28	0.24	0.22	0.21	0.20	0.17	0.15	0.14	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08	0.06	0.06	0.03

Таблица 3
Экспериментальные данные по ферропримесям сахара
Table 3
Experimental Data on Sugar Ferro Impurities

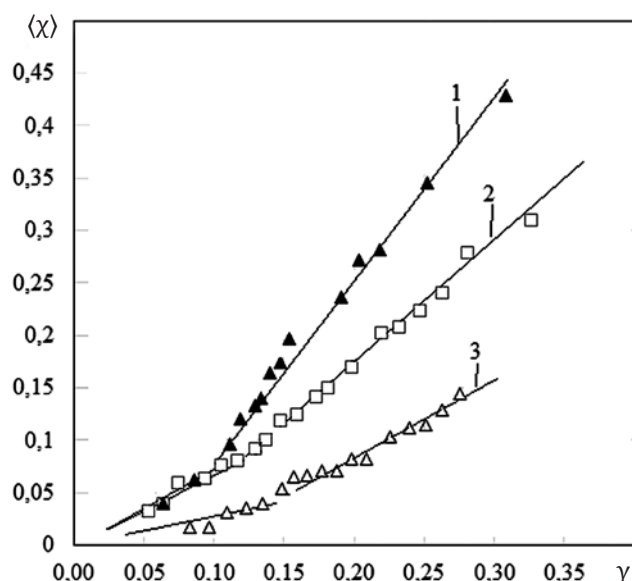
Объемная доля, γ	0.28	0.26	0.25	0.24	0.23	0.21	0.20	0.19	0.18	0.17	0.16	0.15	0.14	0.12	0.11	0.10	0.08
Магнитная восприимчивость образца, $\langle\chi\rangle$	0.14	0.13	0.11	0.11	0.10	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02

Рисунок 1

Влияние объемной доли дисперсной фазы феррочастиц в различных порошковых образцах на магнитную восприимчивость этих образцов

Figure 1

Effect of the Volume Fraction of the Dispersed Phase of Ferroparticles in Different Powder Samples on the Magnetic Susceptibility of These Samples.



Примечание. 1, 2 и 3 — для образцов соответственно с частицами магнетита, частицами ферропримесей измельченного чайного листа и сахара-песка.

Note. 1, 2 and 3 — for samples with magnetite particles, particles of ferrous impurities of crushed tea leaf and granulated sugar, respectively

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты, полученные в ходе экспериментов, подтверждают продуктивность разработанного авторами метода разреженного образца как способа количественного определения магнитной восприимчивости отдельных ферропримесей, содержащихся в пищевых продуктах. Такой подход позволяет восполнить существующий методологический пробел в области изучения магнитных характеристик дисперсных тел малых размеров, на который указывали ранее как российские, так и зарубежные исследователи (Леднев и соавт., 2024; Bjørk et al., 2019; Chen et al., 2018; Sandulyak et al., 2017).

Наибольшее значение магнитной восприимчивости ($\chi = 1,25$) было зафиксировано для эталонного магнетита, что соответствует известным значениям для Fe_3O_4 и подтверждает адекватность экспериментальной установки. В то же время ферропримеси, выделенные из чайного листа, демонстрируют средний уровень восприимчивости ($\chi = 0,9$), а из сахара — наименьший ($\chi = 0,57$). Эти различия наглядно показывают, что магнитные свойства ферропримесей не могут быть сведены к стандартным значениям для типовых железосодержащих соединений. Такой вывод согласуется с критикой некритического заимствования данных из литературы, высказанной рядом авторов (Sandulyak et al., 2022; Sandulyak et al., 2019), подчеркивающих невозможность достоверной экстраполяции характеристик материала на поведение отдельных частиц.

Особое значение имеет выявление линейного участка в зависимости $\langle \chi \rangle$ от объемной доли γ для всех исследованных образцов. Линейный характер зависимости в области $\gamma < 0,12$ – $0,15$ указывает на отсутствие значимых межчастичных магнитных взаимодействий, что позволяет интерпретировать полученные значения $\langle \chi \rangle$ как характеристики, приближенные к истинным значениям для отдельных ферропримесей. Это согласуется с ранее опубликованными результатами, где данный метод применялся к моделированию феррочастиц в дисперсной среде аналогичного типа (Sandulyak et al., 2017; Sandulyak et al., 2019).

В отличие от большинства известных исследований, рассматривающих магнитные свойства агломератов, композитов и порошковых материалов как усредненные (Maciaszek et al., 2024; Schäfer et al., 2023; Мусатов и соавт., 2023; Хачатуров и соавт., 2020), представленный подход позволяет получить данные, релевантные для индивидуальных частиц. Это критически важно в контексте задач магнитной сепарации, поскольку эффективность удаления ферропримесей определяется именно их индивидуальной восприимчивостью, а не усредненными свойствами всей системы.

Практическая значимость полученных данных проявляется в возможности рационального выбора режимов и параметров работы магнитных сепараторов. Как показывают результаты, использование сепараторов, рассчитанных на работу с $\chi > 1$, может быть неэффективным при удалении ферропри-

месей с $\chi < 0,6$, как в случае с сахаром. Тем самым становится очевидной необходимость предварительной диагностики магнитных свойств конкретной продукции с использованием описанного метода, что позволит минимизировать энергозатраты и снизить потери целевого продукта.

Ограничения и дальнейшие направления исследования

Однако исследование имеет и ряд ограничений. Прежде всего, оно не охватывает весь диапазон возможных значений намагничивающей напряженности, что обусловлено параметрами лабораторной установки (максимум 145 кА/м). Это ограничивает применимость метода при исследовании слабомагнитных объектов.

Перспективным направлением дальнейших исследований является сочетание метода разреженного образца с методами морфологического и фазового анализа — такими как сканирующая электронная микроскопия (SEM), энергодисперсионная спектроскопия (EDS) и рентгенофазовый анализ (XRD). Это позволит дополнить количественную магнитную характеристику сведениями о структурном и химическом составе отдельных частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило количественно охарактеризовать магнитную восприимчивость отдельных частиц ферропримесей, выделенных из различных пищевых продуктов, с применением метода разреженного образца. Полученные значения χ существенно различаются в зависимости от происхождения примесей: для частиц магнетита восприимчивость составила 1,25; для примесей из чайного листа — 0,9; для частиц из сахара — 0,57. Эти данные однозначно демонстрируют, что ферропримеси в аграрной продукции не могут рассматриваться как магнитно-однородные и тем более приравниваться к магнетиту или другим типовым соединениям железа.

Выявленная вариативность магнитных свойств подчеркивает необходимость предварительной диагностики ферропримесей конкретной производственной среды перед подбором или проекти-

рованием оборудования для магнитной сепарации. Предложенный метод разреженного образца доказал свою эффективность для оценки магнитной восприимчивости частиц в условиях минимального межчастичного взаимодействия и может быть рекомендован для использования в задачах агропромышленной очистки, а также в более широком спектре исследований, связанных с дисперсными средами.

Методологический вклад работы заключается в экспериментальном подтверждении возможности перехода от характеристик порошковых образцов к оценке свойств отдельных частиц, что ранее оставалось малодоступным. Практическая значимость заключается в создании научно обоснованного инструмента для селективного выбора параметров магнитного воздействия в системах очистки пищевой продукции от ферропримесей.

В перспективе метод может быть дополнен средствами морфологического и фазового анализа, а также адаптирован к работе в более широком диапазоне магнитных полей, что позволит расширить его применимость при исследовании слабомагнитных и структурно сложных объектов.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Полисмакова Мария Николаевна: концептуализация; проведение исследования; создание рукописи и ее редактирование.

Сандуляк Анна Александровна: методология; формальный анализ; ресурсы; создание рукописи и ее редактирование.

AUTHOR'S CONTRIBUTION

Polismakova Maria: conceptualization; investigation; writing-review & editing.

Sandulyak Anna: methodology; formal analysis; resources; writing-review & editing

ЛИТЕРАТУРА

- Говор Г.А., Вечер А.К., & Янушкевич К.И. (2017). Особенности магнитных характеристик новых композиционных материалов на основе порошков железа. Глава 15. *Перспективные материалы и технологии* (том 2, с. 278–299). Витебск: Витебский государственный технологический университет.
- Диканский, Ю. И., Дроздов, А. С., Дорожко, Д. С., Бабкин А. И., & Ли Е. С. (2024). Исследование электрофореза в магнитных коллоидах магнитными методами. *XXI Всероссийская с международным участием Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям* (с. 30–32). Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина.
- Диканский, Ю. И., Гладких, Д. В., & Дорожко, Д. С. (2024). Влияние электрического и магнитного полей на магнитную восприимчивость магнитного коллоида, содержащего намагнитченные агрегаты. *XXI Всероссийская с международным участием Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям* (с. 85–88). Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина.
- Диканский, Ю. И., Испирян, А. Г., Арефьев, И. М., & Куникин, С. А. (2020). Особенности зависимостей намагнитченности насыщения и магнитной восприимчивости магнитного коллоида на основе ундекана от концентрации. *19-я международная Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям* (с. 139–142). Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина.
- Живулько, А. М., Янушкевич, К. И., Даниленко, Е. Г., Зеленев, Ф. В., & Бандурина, О. Н. (2022). Магнитные свойства твердых растворов $Mn_{1-x}Gd_xSe$. *Сибирский аэрокосмический журнал*, 23(4), 748–755. <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2022-23-4-748-755>.
- Леднев, И. С., & Ходакова, Е. А. (2024). Расчет режимов намагничивания деталей авиационной техники. *Журнал «Труды ВИАМ»*, 9(139), 83–92 <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2024-0-9-83-92>
- Мусатов, В.И., Федулов, Ф.А., Савельев, Д.В., Болотина Е.В., & Фетисов Л.Ю. (2023). Нелинейный магнитоэлектрический эффект в кольцевой композитной гетероструктуре. *Russian Technological Journal*, 11(5), 63–70. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-63-70>
- Пучков, П. В., Топоров, А. В., Палин, Д. Ю. (2022). Исследование влияния плотности упаковки частиц наполнителя магнитного эластомерного материала на характеристики магнитного поля в области трения при использовании магнитной жидкости в качестве смазки. *Пожарная и аварийная безопасность*, 2(25), 14–20.
- Сандомирский, С. Г. (2022). Расчет кривой Столетова конструкционных сталей по параметрам предельной петли магнитного гистерезиса. *Электричество*, (1), 18–23. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-1-18-23>
- Хачатуров, А. А., Потапов, Е. Э., Резниченко, С. В., Ковалева, А. Н. (2020). Влияние железорудного концентрата (магнетита) на кинетику вулканизации резиновых смесей на основе бутадиен-стирольного каучука в присутствии различных ускорителей. *Тонкие химические технологии*, 15(5), 46–53.
- Baskar, D., Adler, S. B. (2007). High temperature Faraday balance for *in situ* measurement of magnetization in transition metal oxides. *Review of Scientific Instruments*, 78, 023908. <https://doi.org/10.1063/1.2432476>
- Björk, R., Zhou, Z. (2019). The demagnetization factor for randomly packed spheroidal particles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 476, 417–422. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.01.005>
- Chen, D. X., Pardo, E., Zhu, Y.-H., Xiang, L.-X., Ding, J.-Q. (2018). Demagnetizing correction in fluxmetric measurements of magnetization curves and hysteresis loops of ferromagnetic cylinders. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 449, 447–454. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.10.069>
- Dikansky, Yu. I., Gladkikh, D. V., Dorozhko, D. S., Kurnev, A. V. (2024). Features of Magnetic Susceptibility of a Ferrofluid with a Non-Magnetic Filler. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 88(10), 1513–1517. <https://doi.org/10.1134/S1062873824707852>.
- 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. (2018). A simple vibrating

- sample magnetometer for macroscopic samples. *Review of Scientific Instruments*, 89(3), 034707. <https://doi.org/10.1063/1.5017708>
- Maciaszek, R., Kollár, P., Birčáková, Z., Tkáč, M., Füzer, J., Oleksáková, D., Volavka, D., Samuely, T., Kováč, J., Bureš, R., Fáberová, M. (2024). Effects of particle surface modification on magnetic behavior of soft magnetic Fe@SiO₂ composites and Fe compacts. *Journal of Material Science*, 59, 11781–11798. <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09881-1>
- Mosleh, N., Insinga, A. R., Bahl, C. R. H., Bjørk, R. (2024). The magnetic properties of packings of cylinders. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 607, 172391. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.172391>
- Putri, S., Harun, A., Sulaiman, F. (2022). Preparation of solenoid probe for Eddy Current Testing technique probe. *Journal of Physics: Conference Series*, 2314, 012018.
- Riminucci, A., Uhlarz, M., R. De Santis, Herrmannsdörfer, T. (2017). Analytical balance-based Faraday magnetometer. *Journal of Applied Physics*, 121, 094701. <https://doi.org/10.1063/1.4977719>
- Schäfer, K., Braun, T., Riegg, S., Musekamp, J., Gutfleisch, O. (2023). Polymer-bonded magnets produced by laser powder bed fusion: Influence of powder morphology, filler fraction and energy input on the magnetic and mechanical properties. *Materials Research Bulletin*, 158, 112051. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.00696>
- Thirumurugan, A., Ramadoss, A., Dhanabalan, S., et al. (2022). MXene/Ferrite Magnetic Nanocomposites for Electrochemical Supercapacitor Applications. *Micromachine*, 13(10), 1792. <https://doi.org/10.3390/mi13101792>
- McFarlane, J., Weber, C., Wiechert, A., Yiaccoumi, S., Tsouris, C. (2024). High-gradient magnetic separation of colloidal uranium oxide particles from soil components in aqueous suspensions. *Colloids and Surfaces C: Environmental Aspects*, 2, 100023. <https://doi.org/10.1016/j.colsuc.2023.100023>
- Sandulyak, A. V., Sandulyak, D. A., Ershova, V. A., Sandulyak, A. A., Polismakova, M. N. (2019). A ferroparticle in a magnetizable disperse medium made up of particles of a like nature: Specific aspects of susceptibility determination. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 488, 1653651 <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165365>
- Sandulyak, D. A., Sandulyak, A. A., Kiselev, D. O., Sandulyak, A. V., Polismakova, M. N., Kononov, M. A., Ershova, V. A. (2017). Determining the magnetic susceptibility of ferroparticles from the susceptibility of their dispersive samples. *Measurement Techniques*, 60(9), 928–933. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1295-z>
- Sandulyak, A. A., Polismakova, M. N., Sandulyak, D. A., Sandulyak, A. V., Repetunov, R. A., Kurmysheva, A. Yu., Makhboroda, M. A. (2022). Magnetic Susceptibility of Powders and Magnetic particles (Modified Inclusions of Iron Oxides) Carbon Sorbents. *Applied Mechanics and Materials*, 908, 103–111. <https://doi.org/10.4028/p-w721c4>
- Sokolovskiy, V. V., Buchelnikov V. D., Cong D. (2024). Magnetic and structural properties of all-d metal Mn-Ni-Ti Heusler alloys. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics*, 16(2), 78–85. <https://doi.org/10.14529/mmph240208>

REFERENCES

- Govor G.A., Vechev A.K., & Yanushkevich K.I. (2017). Features of magnetic characteristics of new composite materials based on iron powders. Chapter 15. Advanced materials and technologies (vol. 2, pp. 278–299). Vitebsk: Vitebsk State Technological University.
- Dikansky, Yu. I., Drozdov, A. S., Dorozhko, D. S., Babkin A. I., & Li E. S. (2024). Study of electrophoresis in magnetic colloids by magnetic methods. *XXI All-Russian with international participation Plyos scientific conference on nanodispersed magnetic fluids* (pp. 30–32). Ivanovo: Ivanovo State Power Engineering University named after V. I. Lenin.
- Dikansky, Yu. I., Gladkikh, D. V., & Dorozhko, D. S. (2024). Influence of electric and magnetic fields on the magnetic susceptibility of a magnetic colloid containing magnetized aggregates. *XXI All-Russian with International Participation Plyos Scientific Conference on Nanodispersed Magnetic Fluids* (pp. 85–88). Ivanovo: Ivanovo State University.
- Dikansky, Yu. I., Ispiryan, A. G., Arefyev, I. M., & Kunikin, S. A. (2020). Features of the dependencies of the saturation magnetization and magnetic susceptibility of a magnetic colloid based

- on undecane concentration. *19th International Polyos Scientific Conference on Nanodispersed Magnetic Fluids* (pp. 139–142). Ivanovo: Ivanovo State Power Engineering University named after V.I.Lenin.
- Zhivulko A. M., Yanushkevich K. I., Danilenko E. G., Zelenov F.V., Bandurina O.N. (2022). Magnetic properties of Mn1-xGdxSe solid solutions]. *Siberian Aerospace Journal*, 23(4), 748–755. <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2022-23-4-748-755>
- Lednev I.S., & Khodakova E.A. (2023). Prospects for the development of magnetic particle inspection of aircraft parts. *Trudy VIAM*, 9(127), Paper 12. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2023-0-9-132-144>
- Musatov V.I., Fedulov F.A., Savelev D.V., Bolotina E.V., & Fetisov L.Y. (2023). Nonlinear magnetoelectric effect in a ring composite heterostructure. *Russian Technological Journal*, 11(5), 63–70. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-63-70>
- Puchkov, P. V., Toporov, A. V., Palin, D. Yu. (2022). Study of the influence of the packing density of magnetic elastomer material filler particles on the characteristics of the magnetic field in the friction region when using magnetic fluid as a lubricant. *Fire and Emergency Safety*, 2(25), 14–20.
- Sandomirsky, S. G. (2022). Calculation of the Stoletov curve of structural steels based on the parameters of the limiting magnetic hysteresis loop. *Electricity*, (1), 18–23. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-1-18-23>
- Khachaturov A.A., Potapov E.E., Reznichenko S.V., Kovaleva A.N. (2020). Influence of iron ore concentrate (magnetite) on the kinetics of butadiene–styrene rubber-based blend curing in the presence of different accelerators. *Fine Chemical Technologies*, 15(5), 46–53 (In Russ.) <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-15-5-46-53>
- Baskar, D., Adler, S. B. (2007). High temperature Faraday balance for *in situ* measurement of magnetization in transition metal oxides. *Review of Scientific Instruments*, 78, 023908. <https://doi.org/10.1063/1.2432476>
- Bjørk, R., Zhou, Z. (2019). The demagnetization factor for randomly packed spheroidal particles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 476, 417–422. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.01.005>
- Chen, D. X., Pardo, E., Zhu, Y.-H., Xiang, L.-X., Ding, J.-Q. (2018). Demagnetizing correction in fluxmetric measurements of magnetization curves and hysteresis loops of ferromagnetic cylinders. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 449, 447–454. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.10.069>
- Dikansky, Yu. I., Gladkikh, D. V., Dorozhko, D. S., Kurnev, A. V. (2024). Features of Magnetic Susceptibility of a Ferrofluid with a Non-Magnetic Filler. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 88(10), 1513–1517. <https://doi.org/10.1134/S1062873824707852>
- 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. (2018). A simple vibrating sample magnetometer for macroscopic samples. *Review of Scientific Instruments*, 89(3), 034707. <https://doi.org/10.1063/1.5017708>
- Maciaszek, R., Kollár, P., Birčáková, Z., Tkáč, M., Füzer, J., Olekšáková, D., Volavka, D., Samuely, T., Kováč, J., Bureš, R., Fáberová, M. (2024). Effects of particle surface modification on magnetic behavior of soft magnetic Fe@SiO2 composites and Fe compacts. *Journal of Material Science*, 59, 11781–11798. <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09881-1>
- Mosleh, N., Insinga, A. R., Bahl, C. R. H., Bjørk, R. (2024). The magnetic properties of packings of cylinders. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 607, 172391. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.172391>
- Putri, S., Harun, A., Sulaiman, F. (2022). Preparation of solenoid probe for Eddy Current Testing technique probe. *Journal of Physics: Conference Series*, 2314, 012018.
- Riminucci, A., Uhlarz, M., R. De Santis, Herrmannsdörfer, T. (2017). Analytical balance-based Faraday magnetometer. *Journal of Applied Physics*, 121, 094701. <https://doi.org/10.1063/1.4977719>
- Schäfer, K., Braun, T., Riegg, S., Musekamp, J., Gutfleisch, O. (2023). Polymer-bonded magnets produced by laser powder bed fusion: Influence of powder morphology, filler fraction and energy input on the magnetic and mechanical properties. *Materials Research Bulletin*, 158, 112051. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.00696>

- Thirumurugan, A., Ramadoss, A., Dhanabalan, S., et al. (2022). MXene/Ferrite Magnetic Nanocomposites for Electrochemical Supercapacitor Applications. *Micromachine*, 13(10), 1792. <https://doi.org/10.3390/mi13101792>
- McFarlane, J., Weber, C., Wiechert, A., Yiacoumi, S., Tsouris, C. (2024). High-gradient magnetic separation of colloidal uranium oxide particles from soil components in aqueous suspensions. *Colloids and Surfaces C: Environmental Aspects*, 2, 100023. <https://doi.org/10.1016/j.colsuc.2023.100023>
- Sandulyak, A. V., Sandulyak, D. A., Ershova, V. A., Sandulyak, A. A., Polismakova, M. N. (2019). A ferroparticle in a magnetizable disperse medium made up of particles of a like nature: Specific aspects of susceptibility determination. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 488, 1653651 <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165365>
- Sandulyak, D. A., Sandulyak, A. A., Kiselev, D. O., Sandulyak, A. V., Polismakova, M. N., Kononov, M. A., Ershova, V. A. (2017). Determining the magnetic susceptibility of ferroparticles from the susceptibility of their dispersive samples. *Measurement Techniques*, 60(9), 928–933. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1295-z>
- Sandulyak, A. A., Polismakova, M. N., Sandulyak, D. A., Sandulyak, A. V., Repetunov, R. A., Kurmysheva, A. Yu., Makhboroda, M. A. (2022). Magnetic Susceptibility of Powders and Magnetic particles (Modified Inclusions of Iron Oxides) Carbon Sorbents. *Applied Mechanics and Materials*, 908, 103–111. <https://doi.org/10.4028/p-w721c4>
- Sokolovskiy, V. V., Buchelnikov V. D., Cong D. (2024). Magnetic and structural properties of all-d metal Mn-Ni-Ti Heusler alloys. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics*, 16(2), 78–85. <https://doi.org/10.14529/mmph240208>

ОБ АВТОРАХ

Полисмакова Мария Николаевна, к.т.н., доцент кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы» МИРЭА — Российский технологический университет, начальник отдела научных исследований метода магнитоореологической диагностики Лаборатории магнитного контроля и разделения материалов МИРЭА — Российский технологический университет (107996, Российская Федерация, г. Москва, ул. Стромынка, д. 20), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4564-6206>, Scopus ID: 36621096600, Researcher ID: O-8796-2017, SPIN-код: 3845-8391, polismakova@mirea.ru

Сандуляк Анна Александровна — д.т.н., профессор кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы» МИРЭА — Российский технологический университет, заведующий Лабораторией магнитного контроля и разделения материалов МИРЭА — Российский технологический университет (107996, Российская Федерация, г. Москва, ул. Стромынка, д. 20), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5111-6092>, Scopus ID: 7004032043, Researcher ID: S-5187-2017, SPIN-код: 8858-1720, sandulyak_a@mirea.ru

ABOUT THE AUTHOR

Maria N. Polismakova — Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, Department “Information-Measuring and Control Systems” MIREA — Russian Technological University, Head of the Department of Scientific Research of Magnetorheological Diagnostic Method, Laboratory of Magnetic Control and Material Separation, MIREA — Russian Technological University (107996, Russian Federation, Moscow, Stromynka str.20). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4564-6206>, Scopus ID: 36621096600, Researcher ID: O-8796-2017, SPIN-код: 3845-8391, polismakova@mirea.ru

Anna A. Sandulyak — Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department “Information-Measuring and Control Systems” MIREA — Russian Technological University, Head of the Laboratory of Magnetic Control and Material Separation, MIREA — Russian Technological University (107996 Moscow, Stromynka str.20). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5111-6092>, Scopus ID: 7004032043, Researcher ID: S-5187-2017, SPIN-код: 8858-1720, sandulyak_a@mirea.ru