

УДК 537.621

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-36-44>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

К модели поцепочного намагничивания гранулированной среды: вариант магнитной диагностики цепочек шаров

А.А. Сандуляк,
Д.А. Сандуляк[@],
Ю.О. Горпиненко,
В.А. Ершова,
А.В. Сандуляк

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме. Кроме информации о магнитных параметрах неоднородных, в частности гранулированных, магнетиков, обычно изучаемых в рамках модели квазисплошной среды, не меньший интерес представляет получение информации с позиций модели, когда объект изучения – характерные элементы неоднородного магнетика. Согласно хорошо зарекомендовавшей себя модели избирательного намагничивания гранулированной среды такими элементами, из которых состоит эта среда, являются цепочки гранул – прямые и извилистые, всегда проявляющие себя в направлении ее намагничивания. Они выполняют функцию проводников-каналов генерируемого магнитного потока сквозь гранулированную среду, вследствие чего она представляет собой своеобразный разветвленный «жгут» проводников-каналов. Для любой же из цепочек гранул, например, гранул-шаров радиусом R концептуально значимыми являются магнитные параметры ее условных сердцевин радиусом $r \leq R$. Эти параметры, прежде всего, магнитная проницаемость квазисплошных сердцевин и магнитная индукция в них, для разных (по r) сердцевин переменны, что требует соответствующей магнитной диагностики. Для выяснения магнитных параметров условных сердцевин цепочки гранул-шаров как физически самодостаточного элемента гранулированной среды (т.е. в соответствии с моделью поцепочного намагничивания такой среды), измерительные датчики магнитного потока в сердцевине практически выполнять в виде круговых датчиков, окружающих точку контакта гранул-шаров, но не традиционных петель из провода, а контуров на тонких печатных платах с посадочными отверстиями, помещаемых между смежными шарами. На основании полученных данных магнитного потока в разных по радиусу r сердцевинах ($r/R = 0.2–0.9$) цепочки шаров радиусом $R = 20$ мкм определены значения магнитной индукции B в них, а также их магнитной проницаемости μ при намагничивании цепочки в соленоиде полем напряженностью от 4.8 до 54.5 кА/м. Показано, что при формальном утолщении сердцевин значения B и μ снижаются ввиду уменьшения объема ферромагнетика в сердцевине, а для предельной сердцевины ($r/R \rightarrow 1$), т.е. для цепочки в целом они ожидаемо соответствуют значениям B и μ для полишаровой среды-засыпки.

Ключевые слова: намагничивание цепочки шаров, условные сердцевинки, контуры-датчики магнитного потока, магнитная индукция и проницаемость

• Поступила: 23.03.2021 • Доработана: 30.03.2021 • Принята к опубликованию: 25.05.2021

Для цитирования: Сандуляк А.А., Сандуляк Д.А., Горпиненко Ю.О., Ершова В.А., Сандуляк А.В. К модели поцепочного намагничивания гранулированной среды: вариант магнитной диагностики цепочек шаров. *Russ. Technol. J.* 2021;9(5):36–44. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-36-44>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Towards a model of chain-by-chain magnetization of a granular medium: a variant of magnetic diagnostics of chains of spheres

Anna A. Sandulyak,
Daria A. Sandulyak[@],
Yurij O. Gorpinenko,
Vera A. Ershova,
Alexander V. Sandulyak

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract. In addition to information on the magnetic parameters of inhomogeneous magnetics, in particular, granular magnetics usually studied within the framework of the quasi-continuous medium model, it is of no less interest to obtain information from the standpoint of the model, when the object of study is the characteristic elements of an inhomogeneous magnetic. According to the well-proven model of selective magnetization of a granular medium, the elements that make up this medium are chains of granules – straight and sinuous, always manifesting themselves in the direction of its magnetization. They perform the function of conductor channels of the generated magnetic flux through the granular medium. As a result, it is a kind of branched «bundle» of conductor channels. For any of the chains of granules, for example, granules-balls of radius R , conceptually significant are the magnetic parameters of its conditional cores with radius $r \leq R$, and these parameters, first of all, the magnetic permeability of quasi-continuous cores and magnetic induction in them, for different (in r) cores are variable, which requires appropriate magnetic diagnostics. To clarify the magnetic parameters of the conditional cores of a chain of granules-balls, as a physically self-sufficient element of a granular medium (i.e., in accordance with the model of chain-link magnetization of such a medium), it is practical to make measuring magnetic flux sensors in the core as circular sensors surrounding the contact point of granules-balls, however, not as traditional wire loops, but as circuits on thin printed circuit boards (with mounting holes) placed between adjacent balls. Based on the obtained data of the magnetic flux in cores of different radii r ($r/R = 0.2–0.9$) of a chain of spheres with a radius of $R = 20$ mm, the values of the magnetic induction B in them, as well as their magnetic permeability μ , were determined when the chain is magnetized in the solenoid by a field of strength from 4.8 to 54.5 kA/m. It is shown that with formal thickening of the cores, the values of B and μ decrease due to a decrease in the volume of the ferromagnet in the core, and for the limiting core ($r/R \rightarrow 1$), i.e., for the chain as a whole, they correspond to the values of B and μ for a poly-ball backfill medium.

Keywords: magnetization of a chain of spheres, conditional cores, contours-sensors of magnetic flux, magnetic induction and permeability

• Submitted: 23.03.2021 • Revised: 30.03.2021 • Accepted: 25.05.2021

For citation: Sandulyak A.A., Sandulyak D.A., Gorpinenko Y.O., Ershova V.A., Sandulyak A.V. Towards a model of chain-by-chain magnetization of a granular medium: a variant of magnetic diagnostics of chains of spheres. *Russ. Technol. J.* 2021;9(5):36–44 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-36-44>

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

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ. О РОЛИ ЦЕПОЧЕК ГРАНУЛ В НАМАГНИЧИВАЕМОЙ ГРАНУЛИРОВАННОЙ СРЕДЕ

Задача изучения магнитных свойств различных неоднородных магнетиков, в частности, композитов, суспензий, порошков, засыпок гранул и пр. [1–13], хотя и квалифицируется как более сложная по сравнению с традиционной задачей изучения магнитных свойств однородных (сплошных) магнетиков, в большинстве случаев сводится к получению таких же, что и для сплошных магнетиков, характеристик магнитных параметров. В этом случае магнитные параметры изучаемого, по сути – квазисплошного, магнетика часто именуются так называемыми эффективными параметрами.

Наряду с получением именно такой информации, т.е. с позиций этой макромодели, как характеризующей тот или иной неоднородный магнетик в целом, важным представляется получение информации о его «локальных» магнитных параметрах – информации с позиций как бы микромоделей. И в качестве предпочтительных здесь объектов изучения следовало бы брать те характерные, в том числе составные, элементы того или иного вида неоднородной среды, микромоделные магнитные параметры которых позволяют непосредственно выходить на макромодельные магнитные параметры неоднородного магнетика в целом.

В частности, подобное решение реализовано применительно к весьма распространенному виду неоднородных магнетиков – гранулированной среде [13–16], где в рамках оригинальной модели ее избирательного намагничивания показана принципиальная роль таких элементов гранулированной среды, как цепочки гранул, прямых и извилистых, которые всегда проявляют себя в направлении намагничивания этой среды. Они выполняют функцию проводников-каналов генерируемого магнитного потока, а о принципиальной роли этих составных элементов гранулированной среды, представляющей собой своеобразный разветвленный «жгут» проводников-каналов, свидетельствует сходство полевых зависимостей индукции для уединенной цепочки гранул и гранулированной среды в целом [13–16].

РАЗВИТИЕ ПОДХОДА К МАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКЕ ЦЕПОЧКИ ГРАНУЛ-ШАРОВ

Что касается любой из цепочек гранул, например, гранул-шаров радиусом R , то согласно модели [13–16] концептуально значимыми являются магнитные параметры ее условных сердцевин радиусом $r \leq R$, разумеется – как квазисплошных магнетиков. Такие параметры, прежде всего, их магнитная проницаемость и магнитная индукция в них для разных по r сердцевин переменны – ввиду взаимного различия их магнитного сопротивления из-за отличающихся объемов промежутков между поверхностями смежных гранул и, следовательно, различных объемов металла в таких сердцевинах. Для предельной же сердцевины ($r \rightarrow R$) эти параметры практически соответствуют таковым для гранулированной среды в целом, что указывает на наличие ожидаемых связей между микромоделными и макромодельными параметрами.

О вариативности магнитных параметров разных сердцевин цепочки шаров свидетельствуют как соответствующие расчеты, так и прямая магнитная диагностика поля в клинообразном объеме между шарами выделенной цепочки шаров [13–16]. Результативным вариантом выполнения такой диагностики, которую в малых по размерам объемах, как известно, реализовать сравнительно сложно, является измерение магнитных потоков (микропотоков) Φ сквозь концентричные, подключаемые к микровеберметру, круговые петли разного радиуса $r \leq R$, окружающие точку контакта шаров. Такие петли-датчики располагаются между смежными шарами в средней части намагничиваемой цепочки шаров. Углубляя петли-датчики в столь малый, сужающийся при приближении к точке контакта шаров объем между шарами, можно получать данные Φ для сердцевин даже сравнительно небольшого относительного радиуса r/R , особенно если использовать цепочку шаров повышенного радиуса R , а петли – из весьма тонкого провода.

Этот подход усовершенствован в [17, 18] для того, чтобы избежать трудностей, связанных с обеспечением необходимых здесь требований к таким датчикам, особенно углубляемым, а потому вынужденно выполняемым из весьма тонкого провода. Так,

требуется обеспечивать четко круговую (в виде строгой окружности) форму датчика, concentричность в случае пользования системой датчиков разного радиуса, фиксацию датчика и/или системы датчиков в плоскости симметрии межшарового объема, исключая при этом возможное смещение их центров относительно точки контакта шаров. Применительно же к рассматриваемой задаче, когда цепочка шаров 1 (рис. 1) намагничивается, например, в соленоиде 2, этим требованиям в достаточно полной мере удовлетворяет датчик 3, представляющий собой тонкую плоскую печатную плату с токопроводящим круговым контуром или системой concentричных контуров-датчиков на ней. Каждый из контуров, разумеется, имеет малый разрыв для проводного соединения свободных концов с микровеберметром.

Применение оговоренной рабочей платы фактически обеспечивает строгую форму контура-датчика и/или каждого из них в системе контуров-датчиков, а именно геометрически идеальную окружность на плоской поверхности. Обеспечивается также, причем несложно, фиксация контура-датчика и/или системы concentричных контуров-датчиков в плоскости симметрии объема между намагничиваемыми шарами, куда помещается такая рабочая плата, причем без опасения возможного смещения центра контура и/или системы контуров относительно точки контакта шаров. Для этого в средней части рабочей платы имеется concentричное контуру-датчику и/или системе контуров-датчиков отверстие. Как следует из соответствующих геометрических связей [17, 18], его посадочный диаметр d_0 , в зависимости от выбранных шаров радиусом R и толщины δ тонкой рабочей платы, должен составлять величину $d_0 = [\delta(4R - \delta)]^{0.5}$.

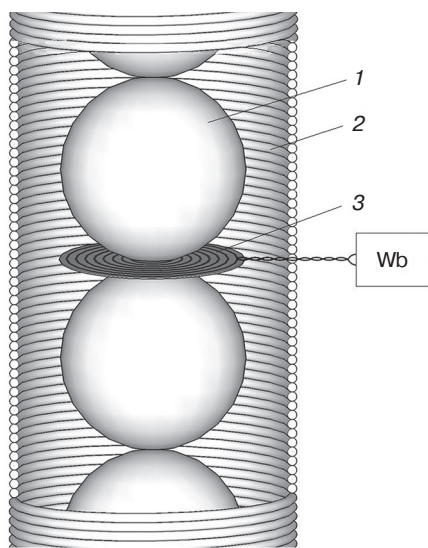


Рис. 1. Иллюстрация цепочки шаров 1, намагничиваемой в поле соленоида 2 с размещенными между шарами круговыми, подключаемыми к микровеберметру, контурами-датчиками 3 на тонкой печатной плате

ДАННЫЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА В СЕРДЦЕВИНАХ ЦЕПочки ШАРОВ. МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ И ПРОНИЦАЕМОСТЬ

На рис. 2а показаны данные измерений магнитного микропотока Φ сквозь контуры-датчики [17], а значит, сквозь соответствующие по радиусу r сердцевины цепочки шаров радиусом $R = 20$ мм в виде семейства полевых зависимостей для разных значений относительного радиуса r/R . Данные получены с использованием достаточно протяженной цепочки шаров (14 шаров – для минимизации размагничивающего фактора), диапазон изменения напряженности намагничивающего поля: $H = 4.8\text{--}54.5$ кА/м, а диапазон изменения относительного радиуса сердцевин: $r/R = 0.2\text{--}0.9$.

Из рисунка видно, что с повышением H значения Φ монотонно возрастают, причем со снижением интенсивности этого роста по мере повышения H , и это особенно заметно для сравнительно малых значений r/R . Чем больше радиус r сердцевин, тем больше, разумеется, и магнитный поток Φ сквозь нее (рис. 2а), что более наглядно прослеживается на родственном семействе зависимостей Φ от r/R – для разных значений H (рис. 2б).

Используя экспериментальные данные Φ (рис. 2), нетрудно получить данные магнитной индукции B в каждой из квазисплошных сердцевин радиусом r и сечением πr^2 – как $B = \Phi/\pi r^2$, а также данные магнитной проницаемости μ соответствующих сердцевин – как $\mu = B/\mu_0 H = \Phi/\pi r^2 \mu_0 H$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная константа. Установленные для разных (по r/R) сердцевин данные B и μ в виде семейств зависимостей B и μ от H , а также полученные из них не менее информативные семейства зависимостей B и μ от H от r/R (при разных H) показаны на рис. 3 и рис. 4.

Из рис. 3а видно, что с повышением напряженности поля H индукция B в каждой из сердцевин возрастает монотонно, но далее интенсивность этого роста снижается (как и данных Φ на рис. 2а): для сравнительно малых значений r/R – весьма заметно. Чем больше радиус r сердцевин, тем меньше индукция B в ней (рис. 3а): это более наглядно прослеживается на зависимостях B от r/R для разных значений H (рис. 3б).

Что же касается магнитной проницаемости μ соответствующих (по r/R) сердцевин, то с повышением H она снижается (рис. 4а). Как и для данных B (рис. 3), чем больше радиус r сердцевин, тем меньше ее проницаемость μ (рис. 4), что заметно уже по взаимному расположению зависимостей μ от H (рис. 4а), а также по убывающим трендам последовавших из них зависимостей μ от r/R для разных H (рис. 4б).

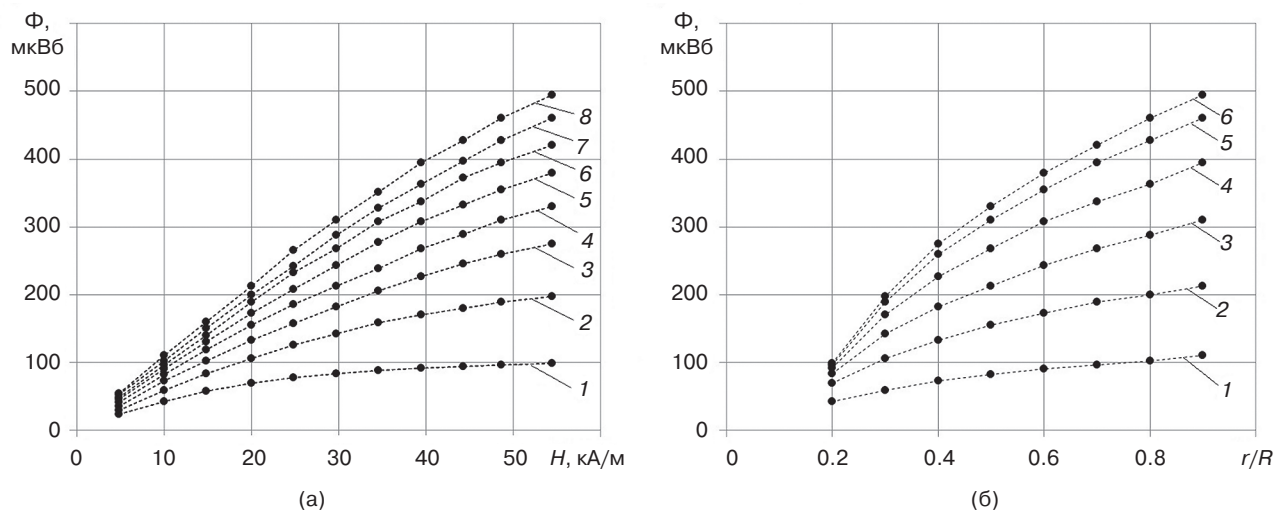


Рис. 2. Зависимости магнитного микропотока Φ сквозь контуры-датчики, охватывающие сердцевин радиуса r в цепочке шаров радиусом $R = 20$ мм: (а) от напряженности поля H (1 – $r/R = 0.2$; 2 – 0.3; 3 – 0.4; 4 – 0.5; 5 – 0.6; 6 – 0.7; 7 – 0.8; 8 – 0.9); (б) от относительного радиуса r/R сердцевин (1 – $H = 10$ кА/м; 2 – 20; 3 – 29.7; 4 – 39.5; 5 – 48.7; 6 – 54.5)

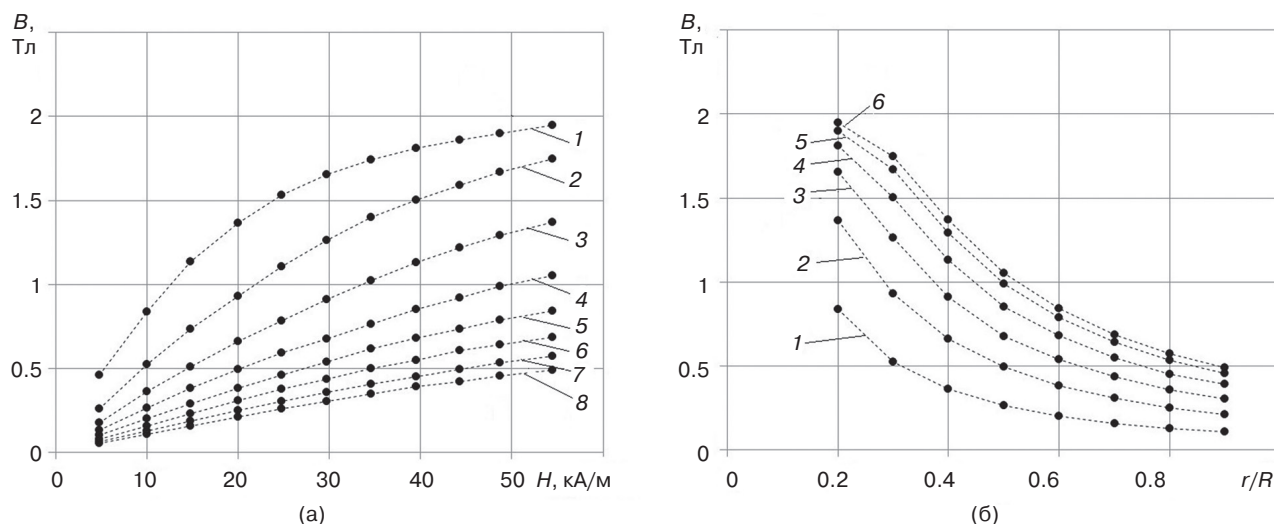


Рис. 3. Зависимости магнитной индукции B в сердцевинах цепочки шаров от напряженности поля H (а) и относительного радиуса r/R сердцевин (б); позиционные обозначения – согласно рис. 2

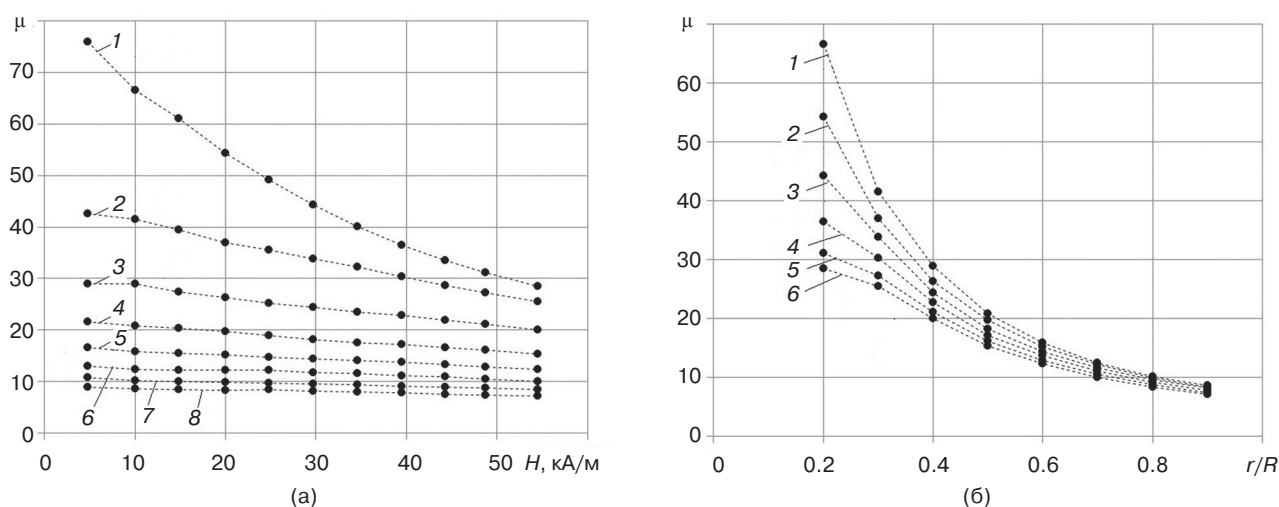


Рис. 4. Зависимости магнитной проницаемости μ сердцевин цепочки шаров от напряженности поля H (а) и относительного радиуса r/R сердцевин (б); позиционные обозначения – согласно рис. 2

Наблюдающееся на рис. 3 и рис. 4 снижение значений B и μ по мере увеличения радиуса r условных сердцевин (относительный радиус r/R которых может изменяться от $r/R \rightarrow 0$ до $r/R = 1$) обусловлено снижением объемной доли γ металла-ферромагнетика в утолщающейся сердцевине. Так, если воспользоваться связью между γ и r/R [17]:

$$\gamma = \frac{2}{3} \left[\sqrt{1 - (r/R)^2} + \frac{1 - \sqrt{1 - (r/R)^2}}{(r/R)^2} \right], \quad (1)$$

то можно данные этих ключевых параметров, а именно магнитной индукции B и магнитной проницаемости μ , представленные на рис. 3б и рис. 4б в координатах с абсциссой r/R , изобразить в координатах с абсциссой γ (рис. 5). Тем самым демонстрируется роль такого «теневого» параметра как объемная доля γ металла в сердцевине цепочки шаров.

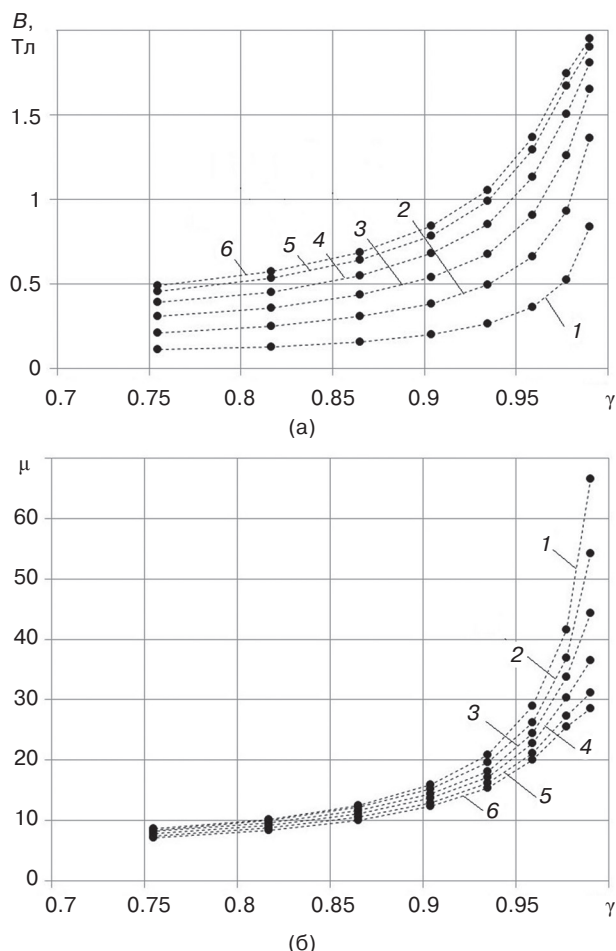


Рис. 5. Зависимости, демонстрирующие влияние объемной доли γ металла в условно выделяемых, разных по радиусу r , сердцевинах цепочки шаров на магнитную индукцию B в них (а) и на их магнитную проницаемость μ (б) – по данным рис. 3 и рис. 4 с учетом связи между γ и r/R согласно зависимости (1)

Так, если следовать этим полученным, весьма показательным трендам зависимостей B и μ от γ на рис. 5 в сторону увеличения γ , то видно, что роль γ проявляется особо после $\gamma = 0.9-0.95$, т.е. при $\gamma \rightarrow 1$ (и соответственно $r/R \rightarrow 0$). Здесь рост значений B и μ явно стремителен – с тенденцией приближения этих значений к значениям B и μ , присущим материалу шаров. Не менее показательны на рис. 5 и тренды зависимостей B и μ от γ , если следовать в сторону уменьшения γ , вплоть до характерных для цепочки значений $\gamma \rightarrow 0.67$ (т.е., соответственно, $r/R \rightarrow 1$). Это позволяет проверить и то концептуальное положение модели намагничивания, согласно которому магнитные свойства цепочки шаров и гранулированной (полишаровой) среды-засыпки должны быть взаимно сходны. Тестом для этого может служить, в частности, сравнение (для цепочки шаров и полишаровой среды-засыпки) полевых зависимостей параметра B и/или полевых зависимостей параметра μ .

Что касается полевых зависимостей магнитной индукции B и проницаемости μ для цепочки шаров, то их можно получить, воспользовавшись данными на рис. 5. Хотя в экспериментах [17] наибольший относительный радиус контуров-датчиков (и охватываемых ими условных сердцевин цепочки шаров) ограничивался значением $r/R = 0.9$ (т.е. $\gamma = 0.755$ на рис. 5), тем не менее, достоверную оценку значениям B и μ , вплоть до требуемого значения $r/R = 1$, т.е. до $\gamma = 0.67$, сделать несложно. Так, тренды зависимостей B и μ от γ в сторону уменьшения γ , будучи при $\gamma < 0.755$ (или, что то же, при $r/R > 0.9$) близкими к автомоделным (рис. 5), поддаются вполне объективной экстраполяции – влево до $\gamma = 0.67$, т.е. до $r/R = 1$. Нетрудно убедиться, что отличия значений как B , так и μ , на которые указывает такая экстраполяция, от значений B и μ при $\gamma = 0.755$ (т.е. при $r/R = 0.9$) весьма незначительные (рис. 5).

Это позволяет изобразить полевые зависимости индукции B и проницаемости μ для цепочки (рис. 6, кривые 1) по обобщающим данным: при $\gamma = 0.755-0.67$ (т.е. при $r/R = 0.9-1$). А для заявленного сравнения здесь же, на рис. 6 (кривые 2), изображены также имеющиеся в [13] полевые зависимости B и μ для полишаровой среды-засыпки. Видно, что с точностью практически до константы сопоставляемые полевые зависимости как индукции B (рис. 6а, кривые 1 и 2), так и проницаемости μ (рис. 6б, кривые 1 и 2) согласуются между собой. Тем самым подтверждается, что цепочка гранул является физически самодостаточным элементом (в составе «жгута» подобных элементов) гранулированной среды, действительно ответственным за намагничивание этой среды.

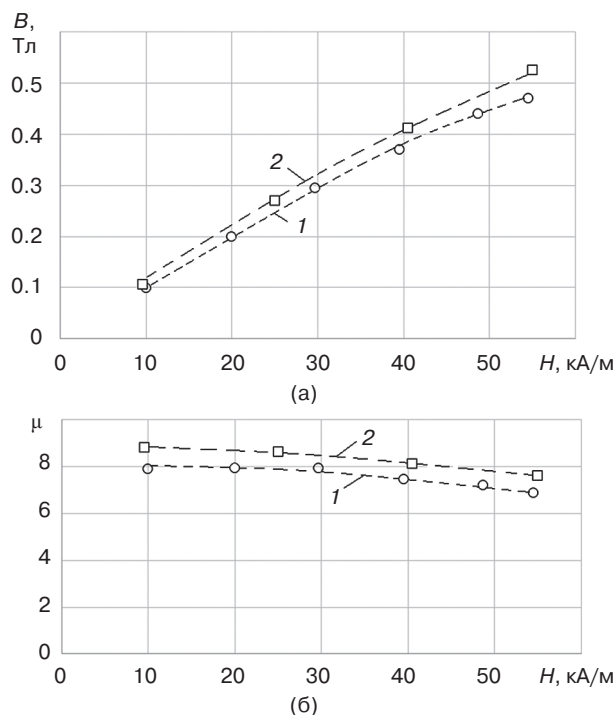


Рис. 6. Полевые зависимости магнитной индукции B (а) и проницаемости μ (б): 1 – для цепочки шаров (практически предельной ее сердцевины, когда $r/R=0.9-1$); 2 – для полишаровой среды-засыпки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из концептуальных положений хорошо зарекомендовавшей себя модели поцепочного намагничивания гранулированной среды является принципиальная роль таких элементов, из которых состоит гранулированная среда, как цепочки гранул – прямых и извилистых, которые всегда проявляют себя в направлении намагничивания этой среды. Они

выполняют функцию проводников-каналов генерируемого магнитного потока, т.е. гранулированная среда представляет собой своеобразный разветвленный «жгут» таких элементов. При этом значимыми являются магнитные параметры разных по радиусу r условных сердцевин цепочки гранул, прежде всего, их магнитная проницаемость и магнитная индукция в них. Для осуществления такого контроля оправдано использование датчиков магнитного потока в виде круговых, окружающих точку контакта шаров, токопроводящих контуров на тонких печатных платах, помещаемых в плоскости симметрии объема между контактирующими шарами. Выполнен анализ полученных результатов измерений магнитных потоков в разных по относительному радиусу ($r/R = 0.2-0.9$) сердцевинах цепочек шаров радиусом $R = 20$ мм при напряженности намагничивающего поля в диапазоне 4.8–54.5 кА/м. Показано, что при формальном утолщении сердцевин значения индукции и проницаемости снижаются ввиду уменьшения объемной доли ферромагнетика в сердцевине, а для предельной сердцевины ($r/R \rightarrow 1$), т.е. цепочки в целом, они согласуются со значениями индукции и проницаемости, присущими полишаровой среде-засыпке. Тем самым подтверждается и соответствующий результат модели поцепочного намагничивания гранулированной среды.

Финансовая поддержка. Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания в сфере науки (проект № 0706-2020-0024); гранта Президента РФ для господдержки молодых ученых (проект МК-807.2020.8).

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mishima F., Terada T., Akiyama Y., Izumi Y., Okazaki H., Nishijima S. Research and development of superconducting magnetic separation system for powdered products. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2008;18(2):824–827. <https://doi.org/10.1109/TASC.2008.920830>
- Eskandarpour A., Iwai K., Asai S. Superconducting magnetic filter: Performance, recovery, and design. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2008;19(2):84–95. <https://doi.org/10.1109/TASC.2009.2014567>
- Bai K., Casara J., Nair-Kanneganti A., Wahl A., Carle F., Brown E. Effective magnetic susceptibility of suspensions of ferromagnetic particles. *Journal of Applied Physics*. 2018;124(12):123901. <https://doi.org/10.1063/1.5041750>
- Birčáková Z., Kollár P., Weidenfeller B., Füzér J., Fáberová M., Bureš R. Reversible and irreversible DC

REFERENCES

- Mishima F., Terada T., Akiyama Y., Izumi Y., Okazaki H., Nishijima S. Research and development of superconducting magnetic separation system for powdered products. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2008;18(2):824–827. <https://doi.org/10.1109/TASC.2008.920830>
- Eskandarpour A., Iwai K., Asai S. Superconducting magnetic filter: Performance, recovery, and design. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2008;19(2):84–95. <https://doi.org/10.1109/TASC.2009.2014567>
- Bai K., Casara J., Nair-Kanneganti A., Wahl A., Carle F., Brown E. Effective magnetic susceptibility of suspensions of ferromagnetic particles. *Journal of Applied Physics*. 2018;124(12):123901. <https://doi.org/10.1063/1.5041750>
- Birčáková Z., Kollár P., Weidenfeller B., Füzér J., Fáberová M., Bureš R. Reversible and irreversible DC magnetization processes in the frame of magnetic, thermal

- magnetization processes in the frame of magnetic, thermal and electrical properties of Fe-based composite materials. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015;645:283–289. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.05.121>
5. Kollár P., Birčáková Z., Vojtek V., Füzér J., Bureš R., Fáberová M. Dependence of demagnetizing fields in Fe-based composite materials on magnetic particle size and the resin content. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015;388:76–81. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.04.008>
 6. Strečková M., Füzér J., Kobera L., Brus J., Fáberová M., Bureš R., Kollár P., Lauda M., Medvecký L., Girman V., Hadraba H., Bat'kova M., Bat'ko I. A comprehensive study of soft magnetic materials based on FeSi spheres and polymeric resin modified by silica nanorods. *Materials Chemistry and Physics*. 2014;147(3):649–660. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.06.004>
 7. Kanhe N.S., Kumar A., Yusuf S.M., Nawale A.B., Gaikwad S.S., Raut S.A., Bhoraskar S.V., Wu S.Y., Das A.K., Mathe V.L. Investigation of structural and magnetic properties of thermal plasma-synthesized $\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x$ alloy nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016;663:30–40. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.11.190>
 8. Pal S.K., Bahadur D. Shape controlled synthesis of iron-cobalt alloy magnetic nanoparticles using soft template method. *Materials Letters*. 2010;64(10):1127–1129. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.01.086>
 9. Moore R.L. Development and test of concentration scaled demagnetization in effective media theories of magnetic composites. *Journal of Applied Physics*. 2019;125(8):085101. <https://doi.org/10.1063/1.5053791>
 10. Périgo E.A., Weidenfeller B., Kollár P., Füzér J. Past, present, and future of soft magnetic composites. *Applied Physics Reviews*. 2018;5(3):031301. <https://doi.org/10.1063/1.5027045>
 11. Moore R.L. Development of a volume fraction scaling function for demagnetization factors in effective media theories of magnetic composites. *AIP Advances*. 2019;9(3):035107. <https://doi.org/10.1063/1.5078736>
 12. Nakamura T., Tsutaoka T., Hatakeyama K. Frequency dispersion of permeability in ferrite composite materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1994;138(3):319–328. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(94\)90054-X](https://doi.org/10.1016/0304-8853(94)90054-X)
 13. Сандуляк А.В. *Магнитно-фильтрационная очистка жидкостей и газов*. М.: Химия; 1988. 136 с. URL: <https://dlib.rsl.ru/viewer/01001440011#?page=136>
 14. Сандуляк А.В., Сандуляк А.А., Ершова В.А. К вопросу о модели поканального намагничивания гранулированной среды (с радиальным профилем проницаемости квазисплошного канала). *Журнал технической физики*. 2009;79(5):140–142.
 15. Сандуляк А.В., Сандуляк А.А., Ершова В.А. Кривая намагничивания гранулированной среды с позиций модели поканального намагничивания (новый подход). *Доклады Академии наук*. 2007;413(4):469–471.
 16. Sandulyak A.A., Sandulyak D.A., Ershova V.A., Sandulyak A.V. Ferrous Material Fill: Magnetization Channels, Layer-by-Layer and Average Permeability, Element-to-Element Field. In book: *Analysis and Modelling of Advanced Structures and Smart Systems*. 2017;81:191–210. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6895-9_9
 - and electrical properties of Fe-based composite materials. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015;645:283–289. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.05.121>
 5. Kollár P., Birčáková Z., Vojtek V., Füzér J., Bureš R., Fáberová M. Dependence of demagnetizing fields in Fe-based composite materials on magnetic particle size and the resin content. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015;388:76–81. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.04.008>
 6. Strečková M., Füzér J., Kobera L., Brus J., Fáberová M., Bureš R., Kollár P., Lauda M., Medvecký L., Girman V., Hadraba H., Bat'kova M., Bat'ko I. A comprehensive study of soft magnetic materials based on FeSi spheres and polymeric resin modified by silica nanorods. *Materials Chemistry and Physics*. 2014;147(3):649–660. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.06.004>
 7. Kanhe N.S., Kumar A., Yusuf S.M., Nawale A.B., Gaikwad S.S., Raut S.A., Bhoraskar S.V., Wu S.Y., Das A.K., Mathe V.L. Investigation of structural and magnetic properties of thermal plasma-synthesized $\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x$ alloy nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016;663:30–40. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.11.190>
 8. Pal S.K., Bahadur D. Shape controlled synthesis of iron-cobalt alloy magnetic nanoparticles using soft template method. *Materials Letters*. 2010;64(10):1127–1129. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.01.086>
 9. Moore R.L. Development and test of concentration scaled demagnetization in effective media theories of magnetic composites. *Journal of Applied Physics*. 2019;125(8):085101. <https://doi.org/10.1063/1.5053791>
 10. Périgo E.A., Weidenfeller B., Kollár P., Füzér J. Past, present, and future of soft magnetic composites. *Applied Physics Reviews*. 2018;5(3):031301. <https://doi.org/10.1063/1.5027045>
 11. Moore R.L. Development of a volume fraction scaling function for demagnetization factors in effective media theories of magnetic composites. *AIP Advances*. 2019;9(3):035107. <https://doi.org/10.1063/1.5078736>
 12. Nakamura T., Tsutaoka T., Hatakeyama K. Frequency dispersion of permeability in ferrite composite materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1994;138(3):319–328. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(94\)90054-X](https://doi.org/10.1016/0304-8853(94)90054-X)
 13. Sandulyak A.V. *Magnitno-fil'tratsionnaya ochistka zhidkostei i gazov* (Magnetic and filtration purification of liquids and gases). Moscow: Khimiya; 1988. 136 p. (in Russ.). Available from URL: <https://dlib.rsl.ru/viewer/01001440011#?page=136>
 14. Sandulyak A.V., Sandulyak A.A., Ershova V.A. On the model of channel-by-channel magnetization of a granular medium (with a radial permeability profile of a quasi-continuous channel). *Technical Physics*. 2009;54(5):743–745. <https://doi.org/10.1134/S1063784209050235> [Sandulyak A.V., Sandulyak A.A., Ershova V.A. On the model of channel-by-channel magnetization of a granular medium (with a radial permeability profile of a quasi-continuous channel). *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Technical Physics*. 2009;79(5):140–142 (in Russ.).]
 15. Sandulyak A.V., Sandulyak A.A., Ershova V.A. Magnetization curve of a granulated medium in terms

17. Сандуляк А.В., Горпиненко Ю.О., Полисмакова М.Н., Сандуляк Д.А., Сандуляк А.А. Магнитный поток и индукция в сердцевинах намагничиваемых цепочек шаров. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2020;96(6–1):96–110. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.96.6.017>
18. Горпиненко Ю.О., Сандуляк А.В., Полисмакова М.Н., Сандуляк Д.А., Сандуляк А.А., Харин А.С. Устройство для измерения магнитного поля: Патент RU 2737024. Заявка № 2020116795. Дата публикации 24.11.2020.
- of the channel-by-channel magnetization model (new approach). *Doklady Physics*. 2007;52(4):179–181. <https://doi.org/10.1134/S1028335807040027>
[Sandulyak A.V., Sandulyak A.A., Ershova V.A. Magnetization curve of a granulated medium in terms of the channel-by-channel magnetization model (new approach). *Doklady Akademii nauk = Doklady Physics*. 2007;413(4):469–471 (in Russ.).]
16. Sandulyak A.A., Sandulyak D.A., Ershova V.A., Sandulyak A.V. Ferrous Material Fill: Magnetization Channels, Layer-by-Layer and Average Permeability, Element-to-Element Field. In book: *Analysis and Modelling of Advanced Structures and Smart Systems*. 2017;81:191–210. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6895-9_9
17. Sandulyak A.V., Gorpinenko Y.O., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Sandulyak A.A. Magnetic flow and induction in the hearts of magnetizable ball chains. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal = International Research Journal*. 2020;96(6–1):96–110 (in Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.96.6.017>
18. Gorpinenko Y.O., Sandulyak A.V., Polismakova M.N., Sandulyak D.A., Sandulyak A.A., Kharin A.S. Ustroystvo dla izmerenija magnitnogo polya (Magnetic field measuring device): RU Pat. 2737024. Publ. 24.11.2020. (in Russ.).

Об авторах

Сандуляк Анна Александровна, д.т.н., профессор, кафедра «Приборы и информационно-измерительные системы» Института комплексной безопасности и специального приборостроения, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: anna.sandulyak@mail.ru. Scopus Author ID 7004032043, <https://orcid.org/0000-0002-5111-6092>

Сандуляк Дарья Александровна, к.т.н., с.н.с., лаборатория магнитного контроля и разделения материалов, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: d.sandulyak@mail.ru. Scopus Author ID 36621369400, <https://orcid.org/0000-0003-4269-6133>

Горпиненко Юрий Олегович, аспирант, кафедра «Приборы и информационно-измерительные системы» Института комплексной безопасности и специального приборостроения, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: gorpinenko1991@mail.ru.

Ершова Вера Александровна, к.т.н., с.н.с., лаборатория магнитного контроля и разделения материалов, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: v.ershova@mail.ru. Scopus Author ID 36771249600, <https://orcid.org/0000-0002-8210-4721>

Сандуляк Александр Васильевич, д.т.н., профессор, кафедра «Приборы и информационно-измерительные системы» Института комплексной безопасности и специального приборостроения, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sandulyak@mirea.ru. Scopus Author ID 57194504434, <https://orcid.org/0000-0001-7605-2702>

About the authors

Anna A. Sandulyak, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Instruments and Information-Measuring Systems, Institute of Integrated Safety and Special Instrument Engineering, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: anna.sandulyak@mail.ru. Scopus Author ID 7004032043, <https://orcid.org/0000-0002-5111-6092>

Daria A. Sandulyak, Cand. Sci. (Eng.), Senior Science Master, Laboratory of Magnetic Control and Material's Separation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: d.sandulyak@mail.ru. Scopus Author ID 36621369400, <https://orcid.org/0000-0003-4269-6133>

Yurij O. Gorpinenko, Postgraduate Student, Department of Instruments and Information-Measuring Systems, Institute of Integrated Safety and Special Instrument Engineering, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: gorpinenko1991@mail.ru.

Vera A. Ershova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Science Master, Laboratory of Magnetic Control and Material's Separation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: v.ershova@mail.ru. Scopus Author ID 36771249600, <https://orcid.org/0000-0002-8210-4721>

Alexander V. Sandulyak, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Instruments and Information-Measuring systems, Institute of Integrated Safety and Special Instrument Engineering, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sandulyak@mirea.ru. Scopus Author ID 57194504434, <https://orcid.org/0000-0001-7605-2702>