

**МОДЕЛЬ «ТРУБОК-СЛОЕВ»  
НАМАГНИЧИВАЕМОЙ ЦЕПОЧКИ ШАРОВ:  
МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА, ОЦЕНКА ГИПЕРУСИЛЕНИЯ ПОЛЯ  
МЕЖДУ ШАРАМИ**

Д.А. Сандуляк  
А.А. Сандуляк  
Ю.О. Горпиненко  
А.В. Сандуляк  
И.А. Соловьев

d.sandulyak@mail.ru  
anna.sandulyak@mail.ru  
linnetdar@mail.ru  
a.sandulyak@mail.ru  
sia8811@mail.ru

**РТУ МИРЭА, Москва, Российская Федерация**

---

**Аннотация**

В намагничиваемом гранулированном материале проводниками-каналами магнитного потока являются цепочки гранул. Получены экспериментальные данные магнитных потоков по восьми условным сердцевинам (разного относительного радиуса  $r_c/R = 0,2-0,9$ ) намагничиваемой цепочки шаров, что позволяет установить данные магнитных потоков по семи «трубкам-слоям» среднего радиуса  $r_p/R = 0,25-0,85$ . В диапазоне напряженности  $H$  намагничивающего поля от 10 до 50...55 кА/м полевые зависимости этого параметра и более универсального (не зависящего от радиуса шаров в цепочке) параметра плотности магнитного потока, т. е. магнитной индукции  $B_p$  в каждой «трубке», близки к линейным. Тем самым практически постоянными в этом диапазоне  $H$  оказываются индивидуальные для разных «трубок» значения их магнитной проницаемости  $\mu_p$ , которая является также носителем важной информации о том, во сколько раз локальная напряженность  $h$  поля между шарами превышает величину  $H$ . При  $r_p/R \leq 0,4$  значения  $h$  на порядок и более превышают  $H$ , а при  $r_p/R > 0,4$  и вплоть до периферии пространства между шарами — в разы. Убывающая зависимость  $\mu_p = h/H$  от  $r_p/R$ , представляющая интерес для решения задач тонкого магнитного разделения материалов (с применением намагничиваемых сред-

**Ключевые слова**

*Намагничиваемая цепочка шаров, «трубки-слои», магнитный поток, магнитная индукция и проницаемость, напряженность поля между шарами*

матриц), подчиняется обратной квадратичной функции, а уровень неоднородности поля — обратной кубической функции

Поступила 16.12.2022

Принята 17.04.2023

© Автор(ы), 2023

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания в сфере науки (проект № 0706-2020-0024)*

**Введение.** В работах [1, 2] альтернативно широко распространенному подходу к изучению магнитных свойств разных неоднородных магнетиков [3–10], т. е. с позиции модели эффективной формально квазисплошной среды, экспериментально детализируется разработанная в [11–13] модель его поканального намагничивания применительно к гранулированному материалу. Основой этой модели является концепция о принципиально важной роли цепочек (прямых и извилистых) гранул, всегда проявляющих себя в направлении намагничивания среды и являющихся проводниками-каналами генерируемого магнитного потока. О статусе цепочки гранул как базовом структурном элементе намагничиваемой гранулированной среды свидетельствует взаимное сходство их кривых намагничивания [2].

Детализация [1, 2] модели поканального (поцепочного) намагничивания заключалась в экспериментальном изучении магнитных параметров разных по радиусу  $r_c$  условных сердцевин цепочек шаров посредством измерения магнитных потоков  $\Phi_c$  в сердцевинах. Это позволило определить средние значения магнитной индукции в той или иной сердцевине  $B_c$  и значения их магнитной проницаемости  $\mu_c$ .

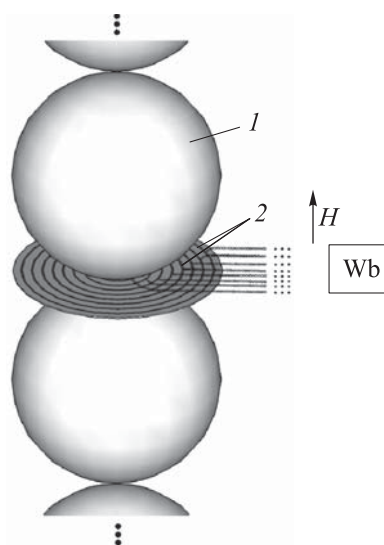
Отметим, что получаемые данные о магнитных потоках  $\Phi_c$  имеют дополнительную информативность, позволяют оценить магнитные свойства условных «трубок» (в квазисплошной цепочке шаров), а именно тех квазисплошных «трубок-магнетиков», которые находятся между сердцевинами меньшего и большего радиусов. Если исследования вести в целях получения значений магнитного потока  $\Phi_p$  в той или иной «трубке», то становятся также доступными соответствующие значения магнитной индукции  $B_p$  в «трубке» и значения ее магнитной проницаемости  $\mu_p$ . Последнее представляется особенно важным не только с точки зрения получения сведений об одном из базовых физических параметров (в данном случае магнитной проницаемости такого специфического магнетика, как квазисплошная «трубка» в цепочке шаров), но и во сколько раз напряженность  $h$  поля в пространстве между шарами (на расстоянии  $r_c$  от оси «трубки») превышает напряженность  $H$  намагничивающего (цепочку)

поля [11–13]. Магнитный поток  $\Phi_p$  в тонкой квазисплохой «трубке» с поперечным сечением  $s_p$  можно определить по формуле  $\Phi_p = \mu_0 \mu_p H s_p$  ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная константа). В то же время магнитный поток  $\Phi_p$  реального участка «трубки», именно в пространстве между шарами, — как  $\Phi_p = \mu_0 h s_p$ . Из этих выражений следует, что  $\mu_p = h / H$ , значит, получение данных магнитной проницаемости той или иной «трубки» в цепочке шаров представляет научный и практический интерес.

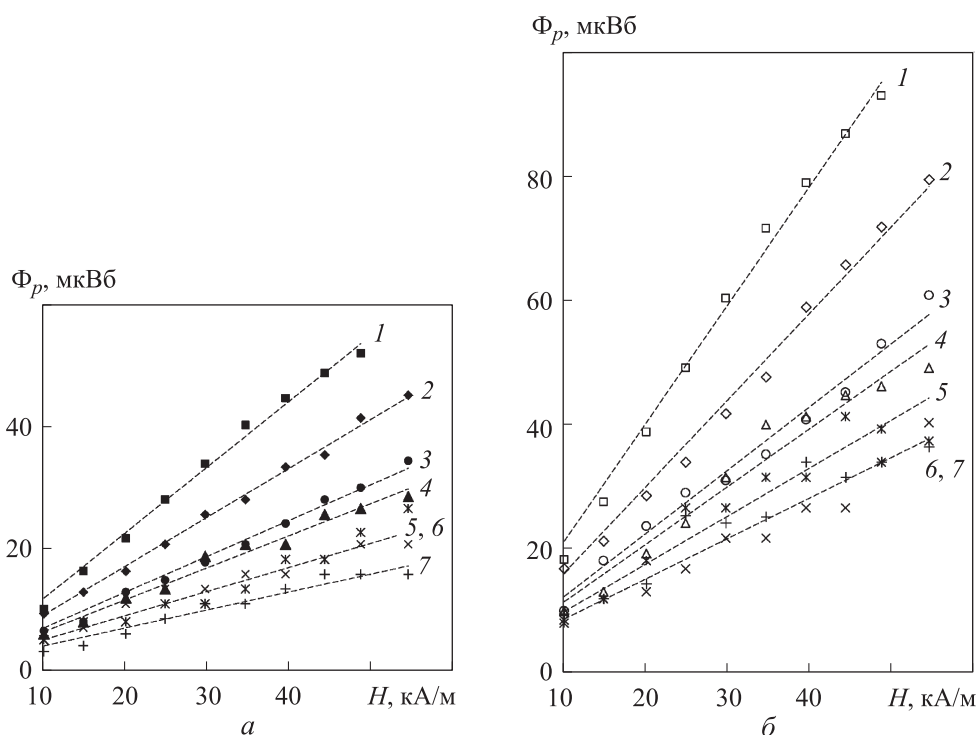
**Результаты исследований и их анализ.** Полевые зависимости магнитного потока и его плотности (магнитной индукции) в «трубках-слоях» намагничиваемой цепочки шаров. Эксперименты, выполненные по методике из [1, 2] с использованием цепочки из 12 шаров (ШХ15) радиусом  $R = 15$  мм и дополнительно шаров радиусом  $R = 20$  мм (применение шаров увеличенного радиуса позволяет помещать вглубь пространства между шарами измерительные датчики), дают сведения о магнитных потоках  $\Phi_c$  в условных сердцевинах цепочки шаров того или иного относительного радиуса  $r_c/R$  (рис. 1). Цепочку шаров намагничивали в соленоиде полем напряженностью  $H = 10 \dots 55$  кА/м.

**Рис. 1.** Схема реализации экспериментов:

1 — цепочка шаров (намагничиваемая в соленоиде); 2 — размещенные на печатной плате контуры-датчики, поочередно подключаемые к веберметру Wb



Основываясь на данных о магнитных потоках  $\Phi_c$ , получаемых с помощью восьми датчиков в виде круговых контуров  $r_c/R = 0,2-0,9$  на тонких печатных платах, определяли магнитные потоки  $\Phi_p$  в семи тонких «трубках-слоях» (рис. 2) как  $\Phi_p = (\Phi_c)_{i+1} - (\Phi_c)_i$ ,  $(\Phi_c)_{i+1}$  и  $(\Phi_c)_i$  — магнитные потоки в  $(i + 1)$ -й сердцевине большего радиуса и смежной  $i$ -й сердцевине меньшего радиуса. Относительные радиусы «трубок-слоев»  $r_p/R$  удобно представлять по их средним значениям, т. е.  $r_p/R = [(r_c/R)_i (r_c/R)_{i+1}] / 2$ , где  $(r_c/R)_i$  и  $(r_c/R)_{i+1}$  — относительные радиусы  $i$ -й и  $(i + 1)$ -й сердцевин



**Рис. 2.** Полевые зависимости магнитного потока в разных по относительному радиусу  $r_p / R$  условных «трубках-слоях» квазиплоской цепочки шаров радиусом  $R = 15, 20$  мм (а, б) при  $r_p / R = 0,25$  (1); 0,35 (2); 0,45 (3); 0,55 (4); 0,65 (5); 0,75 (6); 0,85 (7)

при следующих значениях относительного радиуса «трубок»  $r_p / R = 0,25-0,85$ .

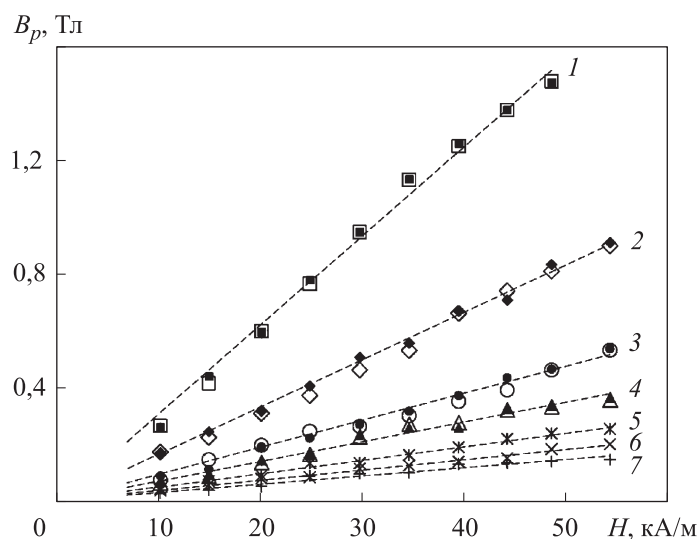
Из рис. 2 следует, что в изучаемом диапазоне напряженности  $H$  намагничивающего поля получаемые из экспериментальных данных полевые зависимости  $\Phi_p$  поддаются аппроксимации линейными (прямыми пропорциональными) зависимостями, причем как для цепочки шаров радиусом 15 мм, так и цепочки шаров радиусом 20 мм.

От магнитного потока  $\Phi_p$  в «трубках» (см. рис. 2) можно перейти к соответствующей плотности (учитывая площадь поперечного сечения той или иной «трубки»), т. е. к магнитной индукции  $B_p$ , используя для этого формулу  $B_p = \Phi_p / [\pi(r_c)_{i+1}^2 - \pi(r_c)_i^2]$ . В таком случае полевые зависимости индукции  $B_p$  в соответствующих «трубках» (рис. 3) также становятся линейными:

$$B_p = k_r H. \tag{1}$$

Здесь коэффициент пропорциональности имеет следующие значения:  $k_r = 31,2 \cdot 10^{-6}$ ;  $16,6 \cdot 10^{-6}$ ;  $9,5 \cdot 10^{-6}$ ;  $6,9 \cdot 10^{-6}$ ;  $4,7 \cdot 10^{-6}$ ;  $3,6 \cdot 10^{-6}$  и  $2,9 \cdot 10^{-6}$  Тл · м/А при  $r_p / R = 0,25$ ;  $0,35$ ;  $0,45$ ;  $0,55$ ;  $0,65$ ;  $0,75$  и  $0,85$  соответственно.

Кроме линейного характера полевых зависимостей индукции  $B_p$  в соответствующих «трубках», из рис. 3 следует, что полевые зависимости индукции, полученные для цепочек шаров радиусом  $R = 15, 20$  мм, взаимно согласуются. Это позволяет сделать вывод о полученном результате как имеющем определенную универсальность, т. е. результат справедлив для цепочек шаров того или иного радиуса.



**Рис. 3.** Полевые зависимости плотности магнитного потока (магнитной индукции) в разных по относительному радиусу  $r_p / R$  (среднему) «трубках-слоях» квазисплошной цепочки шаров радиусом  $R$  от напряженности  $H$  намагничивающего поля при  $r_p / R = 0,25$  (1);  $0,35$  (2);  $0,45$  (3);  $0,55$  (4);  $0,65$  (5);  $0,75$  (6);  $0,85$  (7): точки  $\blacksquare, \blacklozenge, \bullet, \blacktriangle$  (для  $R = 15$  мм) и  $\square, \diamond, \circ, \triangle$  (для  $R = 20$  мм) — зависимости 1–4 соответственно; точки  $\ast, \times, +$  (общие для  $R = 15$  и  $20$  мм) — зависимости 5–7 соответственно

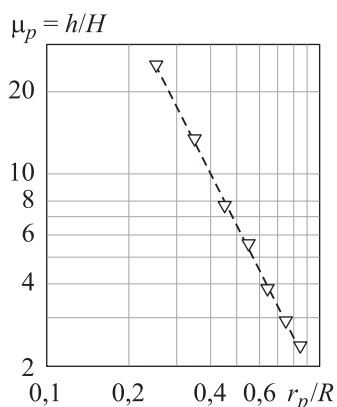
*Магнитная проницаемость «трубок-слоев» намагничиваемой цепочки шаров, функциональная оценка вариативного усиления поля между шарами.* Линейный характер зависимостей  $B_p$  от  $H$  (см. рис. 3) указывает еще на то, что в принятом диапазоне напряженности  $H$  намагничивающего поля магнитная проницаемость  $\mu_p$  каждой изучаемой «трубки» (с относительным радиусом  $r_p / R = 0,25-0,85$ ), вычисляемая как

$$\mu_p = B_p / \mu_0 H = k_r / \mu_0, \quad (2)$$

в том числе с учетом (1), близка к постоянному значению, индивидуальному для конкретной (по  $r_p / R$ ) «трубки».

Что касается влияния относительного радиуса «трубок»  $r_p / R$  на магнитную проницаемость  $\mu_p$  (рис. 4), то она с увеличением  $r_p / R$  уменьшается, причем эта зависимость в выбранных координатах хорошо квазилинеаризуется, что свидетельствует о ней как о степенной функции, близкой к обратной квадратичной:

$$\mu_p = \frac{A_p}{(r_p / R)^2} = \frac{h}{H}, \quad (3)$$



**Рис. 4.** Зависимость магнитной проницаемости  $\mu_p$  от относительного радиуса  $r_p / R$  «трубок-слоев» квазисплошной цепочки шаров

где  $A_p \cong 1,6$ . Функциональная зависимость (3) магнитной проницаемости «трубок»  $\mu_p$  от их относительного радиуса  $r_p / R$  (именно относительного, что позволяет судить о полученном результате, справедливом для цепочек шаров того или иного радиуса) дополнена следующим: величина  $\mu_p$  количественно отражает превышение напряженности  $h$  поля между шарами по сравнению с напряженностью  $H$  намагничивающего (цепочку шаров) поля.

Согласно рис. 4 и функции (3), можно количественно оценить это превышение. Так, на удалении от точки контакта шаров до  $r_p / R = 0,4$  значение  $h$  превышает  $H$  на порядок и более, что позволяет квалифицировать этот факт как гиперусиление поля. Даже при  $r_p / R > 0,4$  вплоть до  $r_p / R = 0,85$ , т. е. почти на периферии пространства между шарами, значение  $h$  превышает  $H$  в разы.

Полученная зависимость (3), записанная в виде выражения для напряженности магнитного поля между шарами

$$h = \frac{A_p H}{(r_p / R)^2}, \quad (4)$$

позволяет использовать ее, в частности, для решения практических задач тонкого (фильтрационного, с применением намагничиваемых сред-

матриц) магнитного разделения материалов, когда возникает необходимость в информации о фактических значениях напряженности поля непосредственно в зоне магнитного разделения.

Кроме того, выражение (4) может оказаться полезным не только в оценках напряженности  $h$  поля. Так, ключевая в подобных случаях магнитная (пондеромоторная) сила  $F_m = \mu_0 V \chi h \nabla h$  [14–20], действующая на магнитоактивную частицу объемом  $V$  и магнитной восприимчивостью  $\chi$ , в значительной мере зависит и от неоднородности поля, характеризующейся градиентом. С помощью выражения (4) можно оценить неоднородность поля как  $dh/dr_p$ , т. е. путем его дифференцирования

$$\left| \frac{dh}{dr_p} \right| = \frac{2A_p H}{R(r_p/R)^3}. \quad (5)$$

При этом доступной также становится информация о магнитном силовом факторе как о произведении (4) и (5):

$$h \left| \frac{dh}{dr_p} \right| = \frac{2A_p^2 H^2}{R(r_p/R)^5}. \quad (6)$$

Следовательно, в случае применения намагничиваемой гранулированной среды-матрицы (в лабораторной и промышленной практике тонкого магнитного разделения) магнитный силовой фактор именно между гранулами, т. е. в зоне активного магнитного воздействия, судя по столь высокой степени при  $r_p/R$ , весьма существен.

**Заключение.** Рассмотрена детализация модели поканального (поцепочного) намагничивания гранулированного материала, в частности, количественная характеристика магнитных параметров «трубок-слоев» квазисплошной намагничиваемой цепочки шаров как структурных базовых элементов такой среды. На основании экспериментальных данных, полученных прямыми измерениями магнитных потоков по восьми условным сердцевинам (разного относительного радиуса  $r_c/R = 0,2-0,9$ ) намагничиваемой цепочки шаров радиусом  $R = 15$  мм и аналогично цепочки шаров радиусом  $R = 20$  мм, проанализированы данные магнитных потоков по соответствующим семи «трубкам-слоям» среднего радиуса  $r_p/R = 0,25-0,85$ . Установлено, что в диапазоне напряженности  $H$  от 10 до 50...55 кА/м намагничивающего поля полевые зависимости магнитного потока в «трубках» (как квазисплошных магнетиках) близки к линейным. То же свойственно и более универсальному (не зависящему от радиусов шаров

в цепочке) такому параметру, как плотность магнитного потока, т. е. магнитной индукции  $B_p$  каждой «трубки». Тем самым практически постоянными в указанном диапазоне напряженности  $H$  намагничивающего поля оказываются индивидуальные для разных «трубок» значения их магнитной проницаемости  $\mu_p$ , которая к тому же является носителем важной информации о том, во сколько раз локальная напряженность  $h$  поля между шарами превышает  $H$ . По полученным значениям магнитной проницаемости  $\mu_p$  для «трубки» ( $\mu_p = h/H$ ) установлено, что при  $r_p/R \leq 0,4$  значения локальной напряженности  $h$  на порядок и более превышают значения напряженности  $H$  намагничивающего поля и даже при  $r_p/R > 0,4$  вплоть до периферийной части пространства между шарами ( $r_p/R = 0,85$ ) превышают в разы. Показано, что убывающая зависимость магнитной проницаемости  $\mu_p$  (и локальной напряженности  $h$ ) от  $r_p/R$  подчиняется обратной степенной (близкой к квадратичной) функции. Это также позволяет функционально оценить уровень неоднородности поля и силовой фактор между гранулами-шарами, что способствует раскрытию выражения для магнитной (пондеромоторной) силы, действующей на магнитоактивную частицу, например, при практической реализации тонкого, в том числе магнитно-фильтрационного, разделения материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sandulyak A.A., Sandulyak D.A., Gorpinenko Y.O., et al. A chain of granules as a model element of a “bundle” of chains in a magnetized matrix: new opportunities for diagnostics. *J. Magn. Magn. Mat.*, 2022, vol. 546, art. 168911.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168911>
- [2] Сандуляк А.А., Сандуляк Д.А., Горпиненко Ю.О. и др. К модели поцепочного намагничивания гранулированной среды: вариант магнитной диагностики цепочек шаров. *Российский технологический журнал*, 2021, т. 9, № 5, с. 36–44.  
DOI: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-36-44>
- [3] Куникин С.А., Вегера Ж.Г., Испирян А.Г. Особенности измерения размеров дисперсных наночастиц магнитных коллоидов. *Приборы*, 2016, № 9, с. 47–50.
- [4] Беззубцева М.М., Волков В.С., Абдурахманов Х.А. Исследование физико-механических процессов в магнитоожигенном слое электромеханических диспергаторов. *Известия СПбГАУ*, 2020, № 58, с. 137–142.  
DOI: <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2020-11137>
- [5] Bjork R., Zhou Z. The demagnetization factor for randomly packed spheroidal particles. *J. Magn. Magn. Mat.*, 2019, vol. 476, pp. 417–422.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.01.005>



- [6] Волковская И.И., Семёнов В.Е., Рыбаков К.И. Эффективная высокочастотная магнитная проницаемость компактированных металлических порошковых материалов. *Известия вузов. Радиофизика*, 2017, т. 60, № 10, с. 892–903.
- [7] Bai K., Casara J., Nair-Kanneganti A., et al. Effective magnetic susceptibility of suspensions of ferromagnetic particles. *J. Appl. Phys.*, 2018, vol. 124, no. 12, art. 123901. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5041750>
- [8] Bakaev V.V., Snarskii A.A., Shamoin M.V. The permeability and remanent magnetization of a randomly inhomogeneous two-phase medium. *Tech. Phys.*, 2002, vol. 47, no. 1, pp. 125–128. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1435901>
- [9] Moore R.L. Development of a volume fraction scaling function for demagnetization factors in effective media theories of magnetic composites. *AIP Adv.*, 2019, vol. 9, no. 3, art. 035107. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5078736>
- [10] Юрасов А.Н., Яшин М.М. Учет влияния распределения размера гранул в нанокompозитах. *Российский технологический журнал*, 2020, т. 8, № 2, с. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-2-59-66>
- [11] 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). *Tech. Phys.*, 2009, vol. 54, no. 5, pp. 743–745. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784209050235>
- [12] 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). *Dokl. Phys.*, 2007, vol. 52, no. 4, pp. 179–181. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028335807040027>
- [13] Sandulyak A.A., Sandulyak D.A., Ershova V.A., et al. Ferrous material fill: magnetization channels, layer-by-layer and average permeability, element-to-element field. In: *Analysis and modelling of advanced structures and smart systems*. Singapore, Springer, 2018, pp. 191–210. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6895-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6895-9_9)
- [14] Mariani G., Fabbri M., Negrini F., et al. High-Gradient Magnetic Separation of pollutant from wastewaters using permanent magnets. *Sep. Purif. Technol.*, 2010, vol. 72, no. 2, pp. 147–155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.01.017>
- [15] Baik S.K., Ha D.W., Ko R.K., et al. Magnetic field analysis of high gradient magnetic separator via finite element analysis. *Phys. C: Supercond.*, 2012, vol. 480, pp. 111–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2012.04.036>
- [16] Hu K., Sun J., Guo Z., et al. A novel magnetic hydrogel with aligned magnetic colloidal assemblies showing controllable enhancement of magnetothermal effect in the presence of alternating magnetic field. *Adv. Mater.*, 2015, vol. 27, no. 15, pp. 2507–2514. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201405757>
- [17] Liu Y.-L., Li D.-W., He J., et al. A periodic magnetic field as a special environment for scientific research created by rotating permanent magnet pair. *Rev. Sc. Instrum.*, 2018, vol. 89, no. 10, art. 105103. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5016570>
- [18] Xue Z., Wang Y., Zheng X., et al. Particle capture of special cross-section matrices in axial high gradient magnetic separation: a 3D simulation. *Sep. Purif. Technol.*, 2020, vol. 237, art. 116375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116375>

[19] Zeng J., Tong X., Yi F., et al. Selective capture of magnetic wires to particles in high gradient magnetic separation. *Minerals*, 2019, vol. 9, no. 9, art. 509.

DOI: <https://doi.org/10.3390/min9090509>

[20] Li W., Zhou L., Han Y., et al. Numerical simulation and experimental verification for magnetic field analysis of thread magnetic matrix in high gradient magnetic separation. *Powder Technol.*, 2019, vol. 355, pp. 300–308.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.024>

**Сандуляк Дарья Александровна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы» РТУ МИРЭА (Российская Федерация, 119454, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**Сандуляк Анна Александровна** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы» РТУ МИРЭА (Российская Федерация, 119454, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**Горпиненко Юрий Олегович** — аспирант кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы» РТУ МИРЭА (Российская Федерация, 119454, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**Сандуляк Александр Васильевич** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы» РТУ МИРЭА (Российская Федерация, 119454, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**Соловьев Игорь Анатольевич** — аспирант кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы» РТУ МИРЭА (Российская Федерация, 119454, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Сандуляк Д.А., Сандуляк А.А., Горпиненко Ю.О. и др. Модель «трубок-слоев» намагничиваемой цепочки шаров: магнитные свойства, оценка гиперусиления поля между шарами. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2023, № 3 (144), с. 49–61. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-3-49-61>

**“PIPE-LAYER” MODEL OF THE MAGNETIZED CHAIN OF SPHERES:  
MAGNETIC PROPERTIES AND ASSESSMENT  
OF THE HYPER-AMPLIFICATION FIELD BETWEEN  
THE SPHERES**

**D.A. Sandulyak**

[d.sandulyak@mail.ru](mailto:d.sandulyak@mail.ru)

**A.A. Sandulyak**

[anna.sandulyak@mail.ru](mailto:anna.sandulyak@mail.ru)

**Yu.O. Gorpinenko**

[linnetdar@mail.ru](mailto:linnetdar@mail.ru)

**A.V. Sandulyak**

[a.sandulyak@mail.ru](mailto:a.sandulyak@mail.ru)

**I.A. Solovev**

[sia8811@mail.ru](mailto:sia8811@mail.ru)

**RTU MIREA, Moscow, Russian Federation**

### Abstract

A chain of granules is the magnetic flux conductive channel in the magnetized granular material. Experimental data on magnetic fluxes were obtained for eight conditional cores (different relative radii  $r_c/R = 0.2-0.9$ ) of the magnetized chain of spheres making it possible to establish the magnetic flux data for seven “pipe-layers” of the  $r_p/R = 0.25-0.85$  average radius. In the  $H$  magnetized field strength range from 10 to 50–55 kA/m, field dependences of this parameter and of the more universal parameter (independent of the radius of the spheres in the chain) of the magnetic flux density, i.e., magnetic induction in each “pipes”, are close to the linear ones. Thus, the values of their magnetic permeability  $\mu_p$  which are individual for different “pipes”, turn out to be essentially constant in this range of  $H$ , which also carries important information about how many times the local field intensity  $h$  between the spheres exceeds the value of  $H$ . At  $r_p/R \leq 0.4$ , the  $h$  values are exceeding by an order of magnitude or more the  $H$  value, and at  $r_p/R > 0.4$  and up to the periphery of the inter-sphere — by several times. The  $\mu_p = h/H$  decreasing dependence on  $r_p/R$ , which is of interest in solving problems of the materials fine magnetic separation (using the magnetized matrix media), obeys the inverse quadratic function, and the field inhomogeneity level to the inverse cubic function

### Keywords

*Magnetized chain of spheres, “pipe-layers”, magnetic flux, magnetic induction and permeability, field strength between spheres*

Received 16.12.2022

Accepted 17.04.2023

© Author(s), 2023

---

*The work was performed with support by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the State Task in the Field of Science (project no. 0706-2020-0024)*

### REFERENCES

- [1] Sandulyak A.A., Sandulyak D.A., Gorpinenko Y.O., et al. A chain of granules as a model element of a “bundle” of chains in a magnetized matrix: new opportunities for diagnostics. *J. Magn. Magn. Mat.*, 2022, vol. 546, art. 168911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168911>
- [2] Sandulyak A.A., Sandulyak D.A., Gorpinenko Yu.O., et al. Towards a model of chain-by-chain magnetization of a granular medium: a variant of magnetic diagnostics of chains of spheres. *Russian Technological Journal*, 2021, vol. 9, no. 5, pp. 36–44 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-36-44>

- [3] Kunikin S.A., Vegera Zh.G., Ispiryani A.G. Features of dispersed nanoparticle size measurements of magnetic colloids. *Pribory*, 2016, no. 9, pp. 47–50 (in Russ.).
- [4] Bezzubtseva M.M., Volkov V.S., Abdurakhmanov Kh.A. Investigation of physical and mechanical processes in a magnetically liquefied layer of electromechanical dispersants. *Izvestiya SPbSAU*, 2020, no. 58, pp. 137–142 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2020-11137>
- [5] Bjork R., Zhou Z. The demagnetization factor for randomly packed spheroidal particles. *J. Magn. Magn. Mat.*, 2019, vol. 476, pp. 417–422.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.01.005>
- [6] Volkovskaya I.I., Semyonov V.E., Rybakov K.I. Effective high-frequency permeability of compacted metal powders. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*, 2017, vol. 60, no. 10, pp. 892–903 (in Russ.).
- [7] Bai K., Casara J., Nair-Kanneganti A., et al. Effective magnetic susceptibility of suspensions of ferromagnetic particles. *J. Appl. Phys.*, 2018, vol. 124, no. 12, art. 123901.  
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5041750>
- [8] Bakaev V.V., Snarskii A.A., Shamonin M.V. The permeability and remanent magnetization of a randomly inhomogeneous two-phase medium. *Tech. Phys.*, 2002, vol. 47, no. 1, pp. 125–128. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1435901>
- [9] Moore R.L. Development of a volume fraction scaling function for demagnetization factors in effective media theories of magnetic composites. *AIP Adv.*, 2019, vol. 9, no. 3, art. 035107. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5078736>
- [10] Yurasov A.N., Yashin M.M. Accounting for the influence of granule size distribution in nanocomposites. *Russian Technological Journal*, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 59–66 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-2-59-66>
- [11] 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). *Tech. Phys.*, 2009, vol. 54, no. 5, pp. 743–745.  
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784209050235>
- [12] 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). *Dokl. Phys.*, 2007, vol. 52, no. 4, pp. 179–181. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028335807040027>
- [13] Sandulyak A.A., Sandulyak D.A., Ershova V.A., et al. Ferrous material fill: magnetization channels, layer-by-layer and average permeability, element-to-element field. In: *Analysis and modelling of advanced structures and smart systems*. Singapore, Springer, 2017, pp. 191–210. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6895-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6895-9_9)
- [14] Mariani G., Fabbri M., Negrini F., et al. High-Gradient Magnetic Separation of pollutant from wastewaters using permanent magnets. *Sep. Purif. Technol.*, 2010, vol. 72, no. 2, pp. 147–155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.01.017>
- [15] Baik S.K., Ha D.W., Ko R.K., et al. Magnetic field analysis of high gradient magnetic separator via finite element analysis. *Phys. C: Supercond.*, 2012, vol. 480, pp. 111–117.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physc.2012.04.036>

- [16] Hu K., Sun J., Guo Z., et al. A novel magnetic hydrogel with aligned magnetic colloidal assemblies showing controllable enhancement of magnetothermal effect in the presence of alternating magnetic field. *Adv. Mater.*, 2015, vol. 27, no. 15, pp. 2507–2514. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201405757>
- [17] Liu Y.-L., Li D.-W., He J., et al. A periodic magnetic field as a special environment for scientific research created by rotating permanent magnet pair. *Rev. Sc. Instrum.*, 2018, vol. 89, no. 10, art. 105103. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5016570>
- [18] Xue Z., Wang Y., Zheng X., et al. Particle capture of special cross-section matrices in axial high gradient magnetic separation: a 3D simulation. *Sep. Purif. Technol.*, 2020, vol. 237, art. 116375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116375>
- [19] Zeng J., Tong X., Yi F., et al. Selective capture of magnetic wires to particles in high gradient magnetic separation. *Minerals*, 2019, vol. 9, no. 9, art. 509. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9090509>
- [20] Li W., Zhou L., Han Y., et al. Numerical simulation and experimental verification for magnetic field analysis of thread magnetic matrix in high gradient magnetic separation. *Powder Technol.*, 2019, vol. 355, pp. 300–308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.024>

**Sandulyak D.A.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Instruments and Information-Measuring Systems, RTU MIREA (Vernadskogo prospekt 78, Moscow, 119454 Russian Federation).

**Sandulyak A.A.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Instruments and Information-Measuring Systems, RTU MIREA (Vernadskogo prospekt 78, Moscow, 119454 Russian Federation).

**Gorpinenko Yu.O.** — Post-Graduate Student, Department of Instruments and Information-Measuring Systems, RTU MIREA (Vernadskogo prospekt 78, Moscow, 119454 Russian Federation).

**Sandulyak A.V.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Instruments and Information-Measuring Systems, RTU MIREA (Vernadskogo prospekt 78, Moscow, 119454 Russian Federation).

**Solovev I.A.** — Post-Graduate Student, Department of Instruments and Information-Measuring Systems, RTU MIREA (Vernadskogo prospekt 78, Moscow, 119454 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

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. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2023, no. 3 (144), pp. 49–61 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-3-49-61>