УДК 537.621.4

# ОБ ОГРАНИЧЕНИИ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ЧАСТИЦ В ДИСПЕРСНОМ ОБРАЗЦЕ (ПРИ КОНТРОЛЕ ИХ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ)

# А.А. Сандуляк, М.Н. Полисмакова, Д.О. Киселев, Д.А. Сандуляк<sup>®</sup>, А.В. Сандуляк

Московский технологический университет, Москва 107996, Россия <sup>®</sup>Автор для переписки, e-mail: d.sandulyak@mail.ru

Для получения данных по магнитной восприимчивости  $\chi_{*}$  феррочастиц, в частности, для решения многих научно-прикладных задач магнитофореза и/или магнитоконтроля этих частиц, достаточно располагать данными о восприимчивости  $\chi$  дисперсного, содержащего указанные частицы, образца. При этом необходимо соблюдать условие обеспечения сравнительно малых допустимых значений их объемной доли (концентрации) γ, когда для определения  $\chi_{u}$  справедлива простая связь:  $\chi_{u} = \chi / \gamma$ . В представленной статье рассмотрен вопрос о допустимом (по сути – критериальном, в настоящее время дискуссионном) значении у, которое, по существовавшим долгое время оценочным данным для образцов магнетита, не превышает у = 0.02-0.05, а по косвенным данным, по проявлению размагничивающего фактора зернистых ферромагнитных образцов, может принимать значения вплоть до у = 0.2-0.25. Выполнены прямые эксперименты, основанные на пондеромоторном методе Фарадея, с использованием порошковых образцов в диапазоне объемной доли дисперсной фазы магнетита γ ≤ 0.3. Показано, что линейный участок зависимости χ от γ, отвечающий оговоренному условию определения  $\chi_{\gamma}$ , заканчивается при значении, близком к  $\gamma \cong 0.2$ . Это подтверждается массивом других данных, полученных на дисперсных образцах магнетита (порошок, коллоид). Вместе с тем, как показали обобщенные результаты, полученные при значениях у ≤ 0.02–0.05, может обнаруживаться «индивидуальная» линейная связь X и у, по коэффициенту пропорциональности в среднем на 18% отличающаяся от предыдущей. Отсюда можно сделать вывод, что для получения более точных значений  $\chi_{u}$  целесообразно использовать данные  $\chi$  при значениях объемной доли дисперсной фазы изучаемых частиц  $\gamma \leq 0.02 - 0.05.$ 

**Ключевые слова:** дисперсная фаза среды, феррочастицы, магнетит, объемная доля, критериальное значение, напряженность поля, магнитная восприимчивость.

## ON LIMITING THE VOLUME FRACTION OF PARTICLES IN THE DISPERSE SAMPLE (FOR THE TASKS ON CONTROLLING THEIR MAGNETIC PROPERTIES)

# A.A. Sandulyak, M.N. Polismakova, D.O. Kiselev, D.A. Sandulyak<sup>@</sup>, A.V. Sandulyak

Moscow Technological University, Moscow 107996, Russia @Corresponding author e-mail: d.sandulyak@mail.ru

> It was found that it is sufficient to have the values of magnetic susceptibility  $\chi_{q}$  of a disperse sample containing ferroparticles to obtain the values of magnetic susceptibility  $\chi_{q}$  of its particles (particularly, in solving many scientific applied tasks of magnetic control and/ or magnetophoresis of such particles). It is important that the values of volume fraction (concentration)  $\gamma$  of the ferroparticles be low (feasible), when simple dependence is acceptable for determining  $\chi_{q}$  values:  $\chi_{q} = \chi/\gamma$ . The question of the criterion value of  $\gamma$  is considered (it is still a discussion question). This value is up to  $\gamma$ =0.02–0.05 (this is evaluated data existing for a long time) for magnetite samples and even up to  $\gamma$ =0.2–0.25 (circumstantial evidence – by

determining the demagnetization factor of disperse ferromagnetic samples). Direct experiments based on the ponderomotive Faraday method are realized with the use of a powder sample within the range of volume fraction  $\gamma \leq 0.3$  (for disperse phase – magnetite). The results of the experiments show that the linear part of  $\chi$  ( $\gamma$ ) relation ends at  $\gamma \cong 0.2$ . This is confirmed by many other consolidate data obtained by using disperse samples of magnetite (powder, colloid). However, at lower values of  $\gamma$  ( $\gamma \leq 0.02-0.05$ ) "individual" linear relation between  $\chi$ and  $\gamma$  is found as the consolidate data show. Taking into account the proportionality coefficient this relation differs from the previous relation by about 18%. This means that it is appropriate to use  $\chi$  values obtained at  $\gamma \leq 0.02-0.05$  for obtaining more accurate values of  $\chi_{\eta}$ .

*Keywords:* disperse phase of medium, ferroparticles, magnetite, volume fraction, criterion value, field intensity, magnetic susceptibility.

### Введение

Дисперсную фазу различных технологических и природных сред могут составлять те или иные феррочастицы, т.е. частицы, обладающие ферро- и ферримагнитными свойствами. В связи с этим для решения многих научно-прикладных задач магнито-фореза и/или магнитоконтроля становится необходимым получение данных о магнитной восприимчивости  $\chi_{u}$  такого рода частиц [1–6].

Как правило, в основе подхода к получению данных  $\chi_{q}$  лежат данные по восприимчивости  $\chi$  дисперсного, содержащего указанные выше частицы, образца (в частности, в виде суспензии, коллоида, порошка). Восприимчивость  $\chi$  целесообразно находить, например, пондеромоторным методом Фарадея, а данные  $\chi_{q}$  – посредством использования такой связи:

$$\chi_{y} = \chi / \gamma , \qquad (1)$$

где *γ* – объемная доля (концентрация) феррочастиц в образце.

Отметим, что для нахождения величины  $\chi$  вполне достаточно обладать образцом весьма малых размеров; кроме того, связь (1) является справедливой лишь при условии достаточного разобщения феррочастиц в исследуемом образце, когда практически исключается их взаимное магнитное влияние, т.е. при сравнительно небольших значениях  $\gamma$ .

Вопрос о допустимом для такого вычисления  $\chi_{q}$  значении  $\gamma = [\gamma]$  следует признать дискуссионным. Так, наряду с данными о жестком ограничении  $\gamma$  до  $\gamma = [\gamma] = 0.02-0.05 \cong 0.035$ , изложенными в работах Кондорского Е.И., Диканского Ю.И., Полихрониди Н.Г., Чеканова В.В. и систематизированными в [7], необходимо обратить внимание на значения размагничивающего фактора образца дисперсной (зернистой) среды [8], которые оказались практически нулевыми при  $\gamma \le 0.2-0.25$ . Поскольку этот фактор вполне можно считать «индикатором» магнитного взаимодействия феррочастиц в дисперсном образце, не исключается возможность совершенно иного концептуального положения – о менее жестком ограничении  $\gamma$ : до  $\gamma = [\gamma] = 0.2-0.25$ . Для разрешения вопроса о допустимом (по сути – критериальном) значении  $\gamma = [\gamma]$  необходимо располагать экспериментальной зависимостью  $\chi$  от  $\gamma$ , на которой следует идентифицировать начальный участок именно прямой пропорциональной связи  $\chi$  и  $\gamma$ , и в расчет по (1) брать те значения  $\chi$ , которые соответствуют условию  $\gamma \leq [\gamma]$ .

Данному вопросу уделено серьезное внимание также в работе [7], где систематизированы полученные рядом исследователей (Кондорский Е.И., Бибик Е.Е., Чеканов В.В., Гребнев С.К. и др.) концентрационные зависимости  $\chi$  для порошков и коллоидов с дисперсной фазой частиц магнетита. На примере таких зависимостей, полученных для разных диапазонов  $\gamma$ (при общем диапазоне 0.1–0.85) и разных значений H, в [7] сделан вывод, что в ранее проведенных исследованиях концентрационные зависимости  $\chi$  для достаточно широких диапазонов  $\gamma$  далеки от прямых пропорциональных. Они поддаются аппроксимации степенной функцией [7]:

$$\chi \sim \gamma^n$$
 (2)

с показателем степени n = 1.1-1.3, поэтому их нельзя признать приемлемыми для решения задачи определения значений  $\gamma$  с применением оговоренной связи (1).

Ранее в [7] было показано, что данные  $\chi$  удовлетворительно квазилинеаризуются в логарифмических координатах в диапазоне  $\gamma$  от 0.065 до 0.2–0.25 (дисперсная фаза – магнетит) (рис. 1). Здесь значение показателя степени *n* составляет по результатам дополнительной обработки данных в Ехсеl в среднем  $n \cong 1.1$ . Следовательно, полученные зависимости в пределах указанных значений  $\gamma$  [7] можно считать близкими к линейным ( $n \cong 1$ ). В этом легко убедиться, если данные  $\chi$ , представленные в [7] в логарифмических координатах для установления связи типа (2) с n > 1 (рис. 1), изобразить в обычных координатах (рис. 2).

Приведенные результаты, допускающие их практически линейную аппроксимацию (рис. 2), указывают на возможность ограничения значений  $\gamma$  в случае использования значений  $\chi$  для нахождения  $\chi_{\mu}$  в соот-



**Рис. 1.** Зависимость магнитной восприимчивости *χ* шарообразного образца порошка от объемной доли *γ* в нем дисперсной фазы магнетита

(в логарифмических координатах) при различных значениях напряженности поля *H* (*кА/м*): 1 – 90; 2 – 150; 3 – 190; 4 – 220; 5 – 270; 6 – 340; 7 – 365; 8 – 420; 9 – 550; 10 – 650; 11 – 730; 12 – 780 [7].

ветствии с (1), по меньшей мере, значением, не превышающим  $\gamma = [\gamma] = 0.2-0.25$ . Для обнаружения же видимого перехода зависимости  $\chi$  от  $\gamma$  из линейной в нелинейную необходимы соответствующие экспериментальные данные в увеличенном диапазоне  $\gamma$ .

## 1. Экспериментальное обнаружение «излома» концентрационных зависимостей восприимчивости дисперсного образца

О возможном критериальном значении  $\gamma$ , не превышающем  $\gamma = [\gamma] = 0.2-0.25$ , можно судить по результатам специальных исследований (рис. 3, 4). Чтобы получить то или иное значение объемной доли  $\gamma$  дисперсной фазы магнетита в исследуемом образце, определенную массу порошка магнетита смешивали с размолотым песком. Предельное значение  $\gamma$  в среде определяли по величине массы порошка и занимаемому им объему с учетом плотности материала частиц.

Для нахождения магнитной восприимчивости использовали пондеромоторный метод Фарадея [9–14], который базируется на измерении силы F, действующей на образец малого объема V, помещаемый в неоднородное магнитное поле напряженностью H (индукцией  $B = \mu_0 H$ ). В работе использовали для этой цели электронные весы типа TH-211 с высокоточным сенсором, который не допускает смещение изучаемого образца во время опытов. По полу-



**Рис. 2.** Зависимость магнитной восприимчивости *χ* шарообразного образца порошка от объемной доли *γ* в нем дисперсной фазы магнетита при различных значениях напряженности поля *H* (*κA*/*м*)<sup>.</sup>

$$\begin{array}{l} 1-90;\ 2-150;\ 3-190;\ 4-220;\ 5-270;\ 6-340;\\ 7-365;\ 8-420;\ 9-550;\ 10-650;\ 11-730;\\ 12-780\ [7].\end{array}$$

ченным данным  $F = \mu_0 \chi \cdot V \cdot HgradH = \chi \cdot V \cdot BgradB/\mu_0$ [11, 12, 14], где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^7 \Gamma_{H/M}$  – магнитная константа, измеряемых значений H (или B) и их координатных характеристик, позволяющих находить *gradH* (или *gradB*), определяли магнитную восприимчивость образца по уравнению:

$$\chi = \frac{F}{\mu_0 \cdot V \cdot H \cdot gradH} = \frac{F\mu_0}{V \cdot B \cdot gradB}.$$
(3)

Основываясь на результатах измерений пондеромоторной силы F и последующего определения по (3) восприимчивости образца  $\chi$  в диапазонах объемной доли магнетита до  $\gamma \cong 0.3$  (рис. 3, 4), можно сделать вывод, что линейный характер зависимостей F и  $\chi$  от  $\gamma$  в принятом диапазоне напряженности поля  $H = 84-141 \ \kappa A/m$ действительно сохраняется почти до  $\gamma \cong 0.2$ . При этом вычисленные по (1) значения магнитной восприимчи-



**Рис. 3.** Влияние объемной доли γ дисперсной фазы магнетита в порошке на пондеромоторную силу *F*, воздействующую на шарообразный образец диаметром 5 *мм* в неоднородном магнитном поле весов Фарадея;

средняя напряженность поля  $H(\kappa A/m)$  в зоне размещения образца: 1 – 84; 2 – 113; 3 – 133; 4 – 141.

вости частиц исследуемого магнетита  $\chi_q$  с использованием величин  $\chi$  и  $\gamma$  при значениях  $\gamma < 0.2$  составляют здесь  $\chi_q = 0.9-0.8$ .

Таким образом, допустимым для вычисления  $\chi_{q}$  по (1) можно считать значение  $\gamma = [\gamma] = 0.2$ , что согласуется с результатом, полученным при рассмотрении данных [7], интерпретированных на рис. 2.

Вместе с тем, представляет интерес более детальный анализ этого обширного массива данных (рис. 2) и в пределах установленного, оказавшегося существенно расширенным, допустимого диапазона  $\gamma \le 0.2$ , и для ранее рекомендованного, существенно суженного, диапазона  $\gamma \le 0.02-0.05$ .

## 2. Анализ концентрационных зависимостей восприимчивости дисперсного образца в пределах расширенного допустимого диапазона концентрации

Кроме иллюстрации на рис. 2 семейства линеаризованных концентрационных зависимостей  $\chi$ , дополнительным подтверждением возможности использования данных  $\chi$ , принадлежащих диапазону  $\gamma \le 0.2-0.25$ , для получения расчетных данных  $\chi_{q}$ по (1), является показанное на рис. 5 искусственное линейное обобщение указанных зависимостей. Оно явилось результатом аппроксимации (в частности, в



**Рис. 4.** Влияние объемной доли у дисперсной фазы магнетита в порошке на магнитную восприимчивость *χ*; средняя напряженность поля *H* (*кА/м*) в зоне размещения образца: 1 – 84; 2 – 113; 3 – 133; 4 – 141.

Excel) данных рис. 2 в виде прямой пропорциональной зависимости:

$$\chi = k_H \times \gamma \,, \tag{4}$$

с нахождением частных значений входящего в (4) коэффициента пропорциональности  $k_H$  (см. таблицу,  $\gamma \le 0.25$ ). Значения  $k_H$  необходимы для получения такого параметра (рис. 5), как отношение  $\chi/k_H$ 



Рис. 5. Обобщение данных рис. 2 для диапазона  $\gamma \le 0.25$ : аппроксимация с использованием значений коэффициента  $k_{_H}$  для  $\gamma \le 0.25$  соответствует биссектрисе прямого угла данной системы координат.

Об ограничении объемной доли частиц в дисперсном образце (при контроле их магнитных свойств)

№	Н, кА/м	Значения k <sub>н</sub>	
		при γ ≤ 0.25	при γ ≤ 0.035
1	90	1.968	1.603
2	150	1.579	1.286
3	190	1.506	1.136
4	220	1.119	0.963
5	270	0.964	0.749
6	340	0.771	0.618
7	365	0.806	0.599
8	420	0.619	0.541
9	550	0.522	0.469
10	650	0.497	0.376
11	730	0.459	0.369
12	780	0.453	0.388

Коэффициент пропорциональности *k<sub>H</sub>* зависимостей на рис. 2 для случая их линейной аппроксимации согласно (4)

Обобщающая зависимость  $\chi/k_H$  от  $\gamma$  (рис. 5) в анализируемой здесь области  $\gamma = 0.065-0.25$  (рис. 2), как и ожидалось, подчиняется биссектрисе прямого угла в избранных для обобщения координатах. Тем самым подтверждается приемлемость линеаризации зависимостей  $\chi$  от  $\gamma$  в диапазоне  $\gamma \le 0.2-0.25$ . Кроме того, становится очевидным тот факт, что данные  $\chi$ , принадлежащие диапазону  $\gamma \le 0.2-0.25$ , действительно могут использоваться для получения расчетных данных  $\chi_u$  по (1).

### 3. Анализ концентрационных зависимостей восприимчивости дисперсного образца в пределах суженного диапазона концентрации

Объем данных на рис. 2 фактически позволяет подвергнуть их объективной обработке не только в расширенном ( $\gamma \le 0.2-0.25$ ), но и в суженном ( $\gamma \le 0.035$ ) диапазоне. По-прежнему, обсуждаемым является интервал значений  $\gamma$ , где связь  $\chi$  с  $\gamma$  наиболее полно соответствует линейной.

Если воспользоваться данными для  $\chi$ , принадлежащими диапазону  $\gamma \le 0.035$  (рис. 2 или рис. 5, затемненная область), то их линейное обобщение, подобно осуществленному выше для значений  $k_H$  (см. таблицу,  $\gamma \le 0.25$ ), не дает желаемого результата. Так, аппроксимация данных  $\chi$  (рис. 6, штриховая линия) не соответствует биссектрисе прямого угла выбранной системы координат (рис. 6, сплошная линия). Отсюда вытекает вывод, что, судя по значениям коэффициента пропорциональности  $k_H$ , линейные концентрационные зависимости  $\chi$ , полученные при  $\gamma \le 0.035$ , отличаются от тех же линеаризованных зависимостей  $\chi$ , полученных при  $\gamma \le 0.25$ .

Прежние значения коэффициента пропорциональности  $k_{H}$  (см. таблицу,  $\gamma \le 0.25$ ) к диапазону  $\gamma \le 0.035$  не вполне применимы. Значения коэффициента  $k_{H}$ здесь (см. таблицу,  $\gamma \le 0.035$ ) оказались отличными



Рис. 6. Обобщение данных рис. 2 для диапазона  $\gamma \le 0.035$ : аппроксимация с использованием значений коэффициента  $k_H$  для  $\gamma \le 0.25$  (см. таблицу) не соответствует биссектрисе прямого угла данной системы координат.

от предыдущих значений коэффициента  $k_H$  (см. таблицу,  $\gamma \le 0.25$ ) в среднем на 18%.

Обобщение значений  $\chi$ , принадлежащих суженному диапазону, с учетом вновь полученных величин коэффициента  $k_{H}$ , показаны на рис. 7: аппроксимация результатов этого обобщения здесь соответствует биссектрисе прямого угла выбранной системы координат.

Следовательно, для получения данных магнитной восприимчивости феррочастиц  $\chi$  по формуле (1) возможными могут являться два варианта использования линейно аппроксимируемых данных магнитной восприимчивости  $\chi$  дисперсного образца с фракцией этих частиц: первый – из диапазона их объемной доли  $\gamma \le 0.2$ , второй – из диапазона  $\gamma \le 0.02$ –0.05, как более точный результат.



Рис. 7. Обобщение данных рис. 2 для диапазона  $\gamma \le 0.035$ : аппроксимация с использованием значений коэффициента  $k_H$  для  $\gamma \le 0.035$  (см. таблицу) соответствует биссектрисе прямого угла данной системы координат.

#### Список литературы:

1. Kawano M., Watarai H. Two-dimensional flow magnetophoresis of microparticles // Analyt. & Bioanalyt. Chem. 2012. V. 403. Is. 9. P. 2645–2653.

2. Nandy K., Chaudhuri S., Ganguly R., Puri I.K. Analytical model for the magnetophoretic capture of magnetic microspheres in microfluidic devices // J. Magn. & Magn. Mater. 2008. V. 320. P. 1398–1405.

3. Murariu V., Svoboda J. The applicability of Davis tube tests to ore separation by drum magnetic separators // Physical Separation in Science and Engineering. 2003. V. 12. № 1. P. 1–11.

4. Das S., Chakraborty S., Sushanta K. Mitra. Magnetohydrodynamics in narrow fluidic channels in presence of spatially non-uniform magnetic fields: framework for combined magnetohydrodynamic and magnetophoretic particle transport // Microfluidics and Nanofluidics. 2012. V. 13. Is. 5. P. 799–807.

5. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Fethi B.M. Belgacem, Kiselev D.O. Special solutions for magnetic separation problems using force and energy conditions for ferro-particles capture // J. Magn. & Magn. Mater. 2016. V. 401. P. 902–905.

6. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Ershova V.A. [et al.] Use of the magnetic test-filter for magnetic control of ferroimpurities of fuels, oils, and other liquids (phenomenological and physical models) // J. Magn. & Magn. Mater. 2017. V. 426. P. 714–720.

7. Сандуляк А.В. Магнитно-фильтрационная очистка жидкостей и газов. М.: Химия, 1988. 133 с.

8. Mattei J.-L., Le Floc'h M. Percolative behaviour and demagnetizing effects in disordered heterostructures // J. Magn. & Magn. Mater. 2003. V. 257. P. 335–345.

#### Заключение

В работе выполнен анализ имеющихся и специально полученных экспериментальных зависимостей магнитной восприимчивости дисперсных образцов, содержащих дисперсную фазу магнетита, от концентрации этой фазы. Обоснована возможность получения информации о восприимчивости самих частиц с использованием данных для начального, практически линейного, участка подобного рода зависимости в диапазоне их объемной доли до 0.2. Обсуждена также возможность повышения точности такой информации для обычно рекомендуемого суженного диапазона  $\gamma$  до 0.02–0.05, где концентрационные зависимости восприимчивости дисперсных образцов подчиняются самостоятельному линейному тренду.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60034 мол\_а\_дк и поддержке Минобрнауки РФ по Госзаданию в сфере научной деятельности № 9.9626.2017.

#### **References:**

1. Kawano M., Watarai H. Two-dimensional flow magnetophoresis of microparticles // Analyt. & Bioanalyt. Chem. 2012. V. 403. Is. 9. P. 2645–2653.

2. Nandy K., Chaudhuri S., Ganguly R., Puri I.K. Analytical model for the magnetophoretic capture of magnetic microspheres in microfluidic devices // J. Magn. & Magn. Mater. 2008. V. 320. P. 1398–1405.

3. Murariu V., Svoboda J. The applicability of Davis tube tests to ore separation by drum magnetic separators // Physical Separation in Science and Engineering. 2003. V. 12. № 1. P. 1–11.

4. Das S., Chakraborty S., Sushanta K. Mitra. Magnetohydrodynamics in narrow fluidic channels in presence of spatially non-uniform magnetic fields: framework for combined magnetohydrodynamic and magnetophoretic particle transport // Microfluidics and Nanofluidics. 2012. V. 13. Is. 5. P. 799–807.

5. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Fethi B.M. Belgacem, Kiselev D.O. Special solutions for magnetic separation problems using force and energy conditions for ferro-particles capture // J. Magn. & Magn. Mater. 2016. V. 401. P. 902–905.

6. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Ershova V.A. [et al.] Use of the magnetic test-filter for magnetic control of ferroimpurities of fuels, oils, and other liquids (phenomenological and physical models) // J. Magn. & Magn. Mater. 2017. V. 426. P. 714–720.

7. Sandulyak A.V. Magnetic filtration purification of liquids and gases. M.: Khimiya Publ., 1988. 133 p. (in Russ.)

8. Mattei J.-L., Le Floc'h M. Percolative behaviour and demagnetizing effects in disordered heterostructures // J. Magn. & Magn. Mater. 2003. V. 257. P. 335–345.

#### Об ограничении объемной доли частиц в дисперсном образце (при контроле их магнитных свойств)

9. Baskar D., Adler S.B. High temperature Faraday balance for in situ measurement of magnetization in transition metal oxides // Rev. Sci. Instrum. 2007. V. 78. № 2. P. 023908.

10. Gopalakrishnan R., Barathan S., Govindarajan D. Magnetic susceptibility measurements on fly ash admixture cement hydrated with groundwater and seawater // Am. J. Mater. Sci. 2012. № 2 (1). P. 32–36.

11. Marcon P., Ostanina K. Overview of methods for magnetic susceptibility measurement // PIERS Proceed. Malaysia, Kuala Lumpur. 2012, March 27–30. P. 420–424.

12. Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Полисмакова М.Н., Киселев Д.О., Сандуляк Д.А. Подход к координации малообъемного образца при реализации пондеромоторного метода определения его магнитной восприимчивости // Российский технологический журнал. 2017. Т. 5. № 2. С. 57–69.

13. Riminucci A., Uhlarz M., De Santis R., Herrmannsdörfer T. Analytical balance-based Faraday magnetometer // J. Appl. Physics. 2017. V. 121. 094701 (1–5).

14. Reutzel S., Herlach D.M. Measuring magnetic susceptibility of undercooled co-based alloys with a Faraday balance // Adv. Eng. Mater. 2001. V. 3. № 1-2. P. 65–67.

9. Baskar D., Adler S.B. High temperature Faraday balance for in situ measurement of magnetization in transition metal oxides // Rev. Sci. Instrum. 2007. V. 78. № 2. P. 023908.

10. Gopalakrishnan R., Barathan S., Govindarajan D. Magnetic susceptibility measurements on fly ash admixture cement hydrated with groundwater and seawater // Am. J. Mater. Sci. 2012. № 2 (1). P. 32–36.

11. Marcon P., Ostanina K. Overview of methods for magnetic susceptibility measurement // PIERS Proceed. Malaysia, Kuala Lumpur. 2012, March 27–30. P. 420–424.

12. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Polismakova M.N., Kiselev D.O., Sandulyak D.A. An approach for choosing positioning of small volume sample at instantiation ponderomotive Faradey method in determining its magnetic susceptibility // Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal (Russian Technological Journal). 2017. V. 5. № 2. P. 57–69. (in Russ.).

13. Riminucci A., Uhlarz M., De Santis R., Herrmannsdörfer T. Analytical balance-based Faraday magnetometer // J. Appl. Physics. 2017. V. 121. 094701 (1–5).

14. Reutzel S., Herlach D.M. Measuring magnetic susceptibility of undercooled co-based alloys with a Faraday balance // Adv. Eng. Mater. 2001. V. 3.  $N_{2}$  1-2. P. 65–67.

#### Об авторах:

**Сандуляк Анна Александровна,** доктор технических наук, профессор кафедры "Приборы и информационно-измерительные системы" Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (107996, г. Москва, ул. Стромынка, д. 20).

**Полисмакова Мария Николаевна**, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры "Приборы и информационно-измерительные системы" Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (107996, г. Москва, ул. Стромынка, д. 20).

**Киселев Дмитрий Олегович,** аспирант кафедры "Приборы и информационно-измерительные системы" Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (1107996, г. Москва, ул. Стромынка, д. 20).

**Сандуляк Дарья Александровна,** кандидат технических наук, инженер ООО "Градиент М" (107996, г. Москва, ул. Стромынка, д.19, корп. 2).

**Сандуляк Александр Васильевич,** доктор технических наук, профессор кафедры "Приборы и информационно-измерительные системы" Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (107996, г. Москва, ул. Стромынка, д. 20).