

**МЕТОДИКА
ПОНДЕРОМОТОРНОГО КОНТРОЛЯ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ
ДИСПЕРСНЫХ ОБРАЗЦОВ
И ЧАСТИЦ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ СОРБЕНТОВ**

Д. А. САНДУЛЯК^{1*}, А. А. САНДУЛЯК¹, М. Н. ПОЛИСМАКОВА¹, В. А. ЕРШОВА¹,
А. В. САНДУЛЯК¹, А. Ю. КУРМЫШЕВА², И. А. СОЛОВЬЕВ¹

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

*d.sandulyak@mail.ru

²Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН, Москва, Россия

Аннотация. Для повышения результативности применения порошковых магнитных сорбентов в технологии очистки сточных вод, когда одной из ключевых стадий этой технологии является оперативное выделение отработанного сорбента магнитной сепарацией, требуется контроль магнитной восприимчивости χ частиц таких сорбентов. Анализируется методология ее определения, основанная на получении экспериментальной зависимости магнитной восприимчивости дисперсного образца $\langle\chi\rangle$ от объемной доли γ в нем контролируемых частиц, где идентифицируемый линейный начальный участок этой зависимости (ограничиваемый критериальным значением $\gamma = [\gamma]$) свидетельствует о практическом отсутствии магнитного взаимодействия частиц. Тогда при $\gamma \leq [\gamma]$ значения χ определяются как $\chi = \langle\chi\rangle/\gamma$. Пондеромоторным методом с использованием модернизированного магнетометра с полюсами сферической формы для создания требуемой зоны стабильной неоднородности поля получена зависимость $\langle\chi\rangle$ от γ для магнитного сорбента (углеродного, с включениями магнетита и маггемита) и установлено значение $[\gamma]$. По величине $\langle\chi\rangle$ из ее линейного участка, до критериального значения $[\gamma]$, определена магнитная восприимчивость χ частицы в поле напряженностью $H = 61 \text{ кА/м}$. Представляется возможным также получить развернутую полевую зависимость для χ .

Ключевые слова: железосодержащий сорбент, магнитная восприимчивость, модернизированный магнетометр пондеромоторного типа, критерий объемной доли частиц

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках госзадания в сфере науки — проект № 0706-2020-0024.

Ссылка для цитирования: Сандуляк Д. А., Сандуляк А. А., Полисмакова М. Н., Ершова В. А., Сандуляк А. В., Курмышева А. Ю., Соловьев И. А. Методика пондеромоторного контроля магнитной восприимчивости дисперсных образцов и частиц железосодержащих сорбентов // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 7. С. 602—611. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-602-611.

**METHOD OF PONDEROMOTIVE CONTROL
OF MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF DISPERSE SAMPLES
AND PARTICLES OF IRON-CONTAINING SORBENTS**

D. A. Sandulyak^{1*}, A. A. Sandulyak¹, M. N. Polismakova¹, V. A. Ershova¹,
A. V. Sandulyak¹, A. Yu. Kurmysheva², I. A. Solov'ev¹

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

*d.sandulyak@mail.ru

²N. D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry of the RAS, Moscow, Russia

Abstract. In order to increase the efficiency of using powder magnetic sorbents in water purification technology, when one of the key stages of this technology is the rapid isolation of spent sorbent by magnetic separation, the control of the magnetic susceptibility χ of the individual particles of such sorbents is needed. The analyzed methodology of determining magnetic susceptibility is based on obtaining experimental dependence of the magnetic susceptibility $\langle\chi\rangle$ of the dispersed sample on the volume fraction γ in it of controlled particles and identifying the linear initial section of this dependence (limited by criterion value $\gamma = [\gamma]$), the specified section of this dependence indicates the practical absence

© Сандуляк Д. А., Сандуляк А. А., Полисмакова М. Н., Ершова В. А., Сандуляк А. В., Курмышева А. Ю., Соловьев И. А., 2023

of magnetic interaction of the particles. So at $\gamma = [\gamma]$, χ -values are determined as $\chi = \langle \chi \rangle / \gamma$. By ponderomotive method (using modernized magnetometer with spherical pole pieces for creating zone of a stable inhomogeneity field) γ -dependence of $\langle \chi \rangle$ is obtained for magnetic sorbent (carbon sorbent with inclusions of magnetite and maghemite), and value of $[\gamma]$ is found. The magnetic susceptibility χ of the particle in the field of strength $H = 61$ kA/m is determined from its linear section, up to the criterion value $[\gamma]$. It also seems possible to obtain an expanded field dependence for χ .

Keywords: iron-containing sorbent, magnetic susceptibility, modernized ponderomotive-type magnetometer, criterion of volume fraction of particles

Acknowledgment: the research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. 0706-2020-0024.

For citation: Sandulyak D. A., Sandulyak A. A., Polismakova M. N., Ershova V. A., Sandulyak A. V., Kurmysheva A. Yu., Solov'ev I. A. Method of ponderomotive control of magnetic susceptibility of disperse samples and particles of iron-containing sorbents. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 7. P. 602—611 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-602-611.

Введение. Решению экологических задач, связанных с очисткой сточных вод, в значительной мере способствует адресная разработка методов контроля систем очистки [1, 2], начиная с контроля параметров их рабочих органов.

В качестве рабочих органов систем очистки сточных вод от тяжелых металлов, красителей, органики, фармацевтических препаратов и других загрязнителей все более широкое применение получают разные сорбенты. При этом для интенсификации отделения этого, но уже отработанного (с накопленными загрязнителями) сорбента от очищенных вод используются так называемые магнитные сорбенты [3—7]. Эти сорбенты-порошки состоят, например, из частиц угля, как химически или пиролизом преобразованной биомассы, которые дополнительно „пропитаны“, в частности посредством соосаждения в щелочной среде с солями двух- и трехвалентного железа, магнитоактивными соединениями железа: магнетитом Fe_3O_4 или/и маггемитом $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Тем самым частицы такого углеродного модифицированного сорбента приобретают еще и определенные магнитные свойства.

Данное преимущество позволяет сравнительно оперативно и экономично выделять отработанный сорбент из очищенной воды — с помощью дополняющих традиционные системы очистки устройств магнитной сепарации. При этом для установления режимов магнитного захвата частиц сорбента необходимо знать, прежде всего, магнитные свойства этих частиц, в частности их магнитную восприимчивость χ . На это указывает известное выражение для пондеромоторной (магнитной) силы F [8—17], действующей на магнитоактивную частицу объемом V в неоднородном ($\text{grad } H \neq 0$) магнитном поле напряженностью H :

$$F = \mu_0 H \text{grad } H \cdot \chi \cdot V, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная константа.

Между тем объем информации о магнитной восприимчивости χ частиц магнитных сорбентов существенно ограничен в основном из-за отсутствия обоснованной методологии решения этой задачи.

Надо признать, что получить эту информацию без выполнения соответствующих измерений вряд ли возможно; она не может быть в достаточной степени предсказуемой, даже если известны метод и компоненты „пропитки“, а также магнитные свойства этих компонентов. Так, в каждом конкретном случае значения χ для частиц сорбента будут индивидуальны из-за произвольного сочетания как разных магнитоактивных (например, Fe_3O_4 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) соединений между собой, так и магнито- и немагнитоактивных соединений, элементов в составе частиц сорбента.

При использовании литературных данных о магнитных свойствах привносимых компонентов (например, магнетита или/и маггемита) следует иметь в виду, что такие данные, как

правило, отражают магнитные свойства не самих частиц этих компонентов, а специальных образцов их материала. Справедливо могут вызывать вопросы также и те имеющиеся данные, которые получены для дисперсных образцов: композитов, конгломератов, порошков, особенно когда сведения о таком влияющем на магнитные свойства дисперсного образца параметре, как объемная доля (концентрация) частиц, не приводятся. Отсутствие же этих сведений не только лишает возможности сопоставлять данные, к примеру, о восприимчивости уплотненного и разреженного дисперсного образца (существенно отличающиеся друг от друга), но и оставляет совершенно неопределенной задачу оценки магнитных свойств именно самих частиц. Это относится к частицам как модифицированного (магнетитом или/и маггемитом) углеродного сорбента [4—7], так и к иным частицам.

Таким образом, формальное заимствование (без должного критического анализа) данных из литературы может даже дезинформировать пользователя, привести к серьезным просчетам в реализации предпринимаемого магнитного воздействия, в данном случае — при исследовании проблемы выделения частиц отработанного магнитного сорбента. Поэтому задача контроля магнитной восприимчивости χ таких частиц — начиная с обоснования методологии контроля с помощью соответствующего магнетометра и завершая получением конкретных значений χ — приобретает научную и практическую значимость.

Методология измерений, приборное обеспечение, результаты измерений. При выполнении экспериментов, направленных на определение магнитной восприимчивости χ частиц магнитного сорбента (например, углеродного порошкового, с „пропиткой“ частицами магнетита или/и маггемита) целесообразно использовать методологический подход, описанный в [18, 19]. Этот подход апробирован применительно к частицам порошкового магнетита и частицам ферропримесей, которые в той или иной мере присутствуют в разных средах преимущественно как последствия износа и коррозии [20] стального оборудования.

Согласно такому подходу необходимо, во-первых, получить экспериментально концентрационную зависимость магнитной восприимчивости $\langle\chi\rangle$ дисперсного образца изучаемых железосодержащих (магнитоактивных) частиц, например зависимость $\langle\chi\rangle$ от объемной доли γ частиц в образце. Заметим, что разные по величине γ образцы предпочтительнее готовить путем разрежения исходного порошка таких частиц, смешивая его с порошком частиц, не являющихся магнитоактивными, в частности с размолотым песком. Следует отметить, что использование для этой цели образца в виде суспензии или коллоида вряд ли имеет смысл: при магнитном воздействии на такую жидкостно-дисперсную среду нарушается первоначальная структура образца, характеризующаяся определенным рассредоточением частиц. Так, в условиях воздействия магнитного поля изучаемые частицы могут беспрепятственно перемещаться по объему среды. Взаимодействуя между собой, они образуют цепочки и агрегаты частиц [21—23], а значит, первоначальная структура образца изменяется, что не способствует получению достоверных результатов.

Во-вторых, должна быть дана оценка характера тренда полученной зависимости $\langle\chi\rangle$ от γ с идентификацией двух выраженных участков, которые разграничиваются определенным, по сути, критериальным [18, 19] значением $\gamma = [\gamma]$. Первый из участков, начальный, проявляется как практически линейно восходящий, а последующий, второй, — как нелинейный, более интенсивно восходящий. При этом линейный вид наиболее важного первого участка, т.е. когда $\langle\chi\rangle \sim \gamma$, свидетельствует о том, что при $\gamma \leq [\gamma]$ магнитоактивные частицы в образце, будучи в определенной мере разобщенными, практически не испытывают взаимного магнитного влияния. Значит, каждую из частиц здесь можно считать уединенной, магнитную восприимчивость χ которой (при том или ином значении напряженности H поля) можно определить, используя отношение

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

привлекая для расчета значения $\langle \chi \rangle$ именно из линейного участка экспериментальной зависимости $\langle \chi \rangle$ от γ , т.е. при $\gamma \leq [\gamma]$, когда $\langle \chi \rangle \sim \gamma$.

Получение значений $\langle \chi \rangle$ затруднений не вызывает, для этого можно воспользоваться одним из известных методов [24—27], например баллистическим. Однако это вполне оправдано лишь в случае, когда для проведения требуемых измерений доступен сравнительно большой (для формирования соответствующего образца) объем дисперсного материала. В тех же случаях, когда приходится иметь дело с дисперсными образцами малого объема, предпочтительно использовать пондеромоторный метод (Фарадея) [18, 19, 27], основанный на данных прямого измерения пондеромоторной силы F , действующей на магнитоактивный образец малого объема $\langle V \rangle$, помещенный в зону неоднородного магнитного поля соответствующего магнетометра. Тогда, если использовать выражение типа (1), записанное для этого образца, то магнитную восприимчивость дисперсного образца $\langle \chi \rangle$ (в поле напряженностью H — усредненной в пределах объема образца) можно определить как

$$\langle \chi \rangle = F / \langle V \rangle \mu_0 H \text{grad} H. \quad (3)$$

Здесь следует оговорить, что при реализации пондеромоторного метода важно располагать таким магнетометром, в котором согласно (3) должно выполняться принципиальное методологическое условие: создание рабочей зоны, предназначенной для размещения в ней изучаемого образца и характеризующейся стабильной неоднородностью поля.

Это условие обеспечивается в модернизированном магнетометре указанного типа [18, 28], особенность которого заключается в том, что полюсные наконечники его электромагнитной системы представляют собой полусферы 1 (рис. 1). Границы создаваемой в нем рабочей зоны визуализируются посредством световых маркеров-полос 2 (верхняя граница) и 3 (нижняя граница) на неферромагнитном экране: прозрачном или непрозрачном. Источниками света соответственно служат подвижные лазерные модули 4 и 5, положение которых по вертикали (в зависимости от применяемых в опытах полюсов-полусфер того или иного диаметра и устанавливаемого расстояния между ними) регулируется программой с использованием платы управления и механической системы перемещения модулей. Поле между полюсами-полусферами диагностируется миллитесламетром, для этого его щуп 6 (с датчиком Холла) крепится на координатном столике.

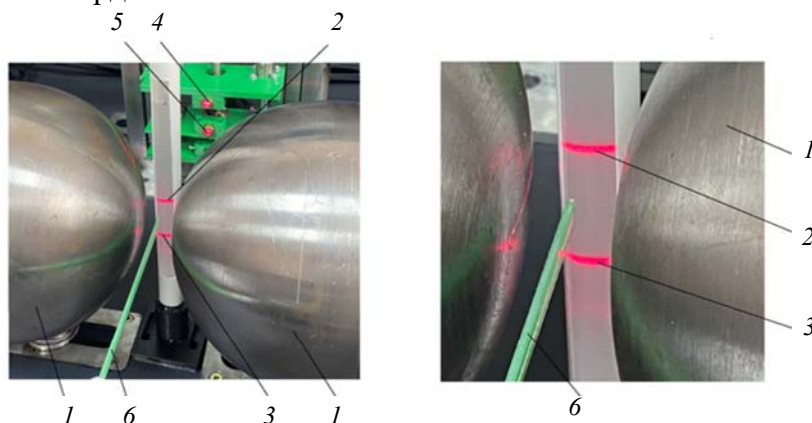


Рис. 1

В опытах использовался тип магнитного сорбента, в котором частицы углеродного сорбента „пропитаны“ частицами магнетита и маггемита посредством соосаждения [3]. Общая информация о дисперсном составе частиц этого сорбента представлена на рис. 2, где

приведены гистограмма распределения по размерам частиц углеродного сорбента (здесь n — количество частиц, d — их размер) и фрагменты фотоиллюстрации этих частиц.

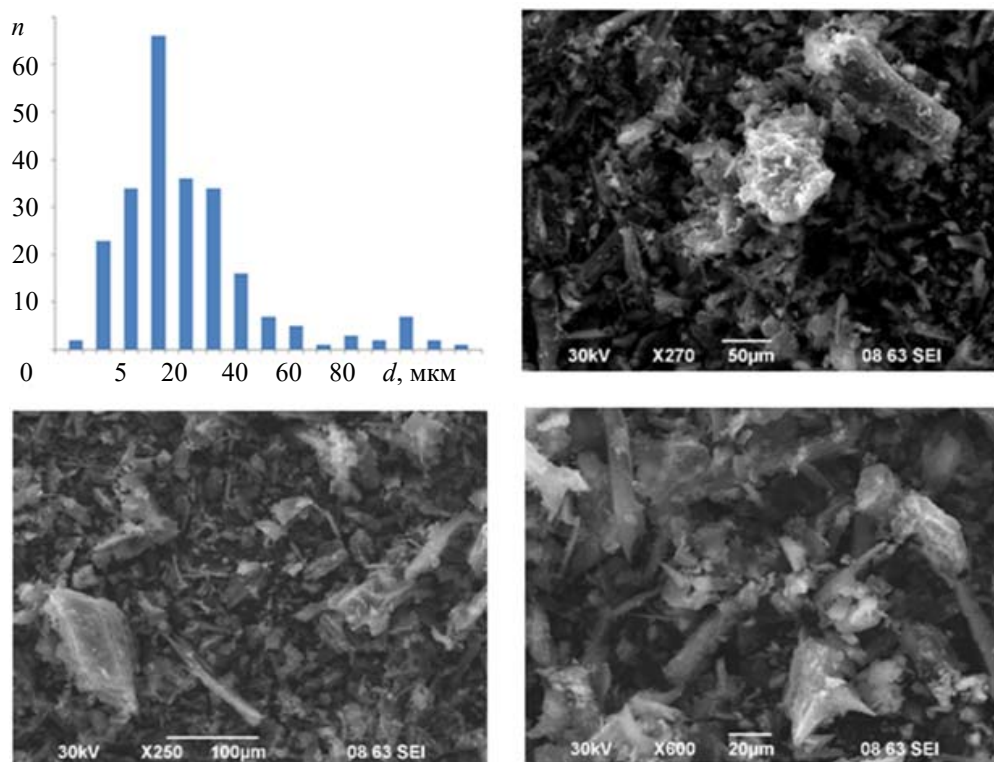


Рис. 2

Для получения согласно (3) данных о магнитной восприимчивости $\langle\chi\rangle$ соответствующего дисперсного образца магнитного сорбента измерялась (посредством рычажного устройства) магнитная сила F , действующая на сферообразную ампулу с изучаемым образцом, помещенным в рабочую зону магнетометра. Целевое использование весов на пьезоэлементах исключало возможность неприемлемого в данном случае перемещения образца при магнитном воздействии на него. Рабочая для образца зона в магнетометре (между полюсами-полусферами диаметром 159 мм) определялась по результатам диагностики поля между ними: полученные координатные зависимости магнитной индукции B позволяют находить соответствующие координатные зависимости $\text{grad } B$, $H = B/\mu_0$ и $\text{grad } H$, в том числе и в рабочей зоне, локализуемой в окрестности экстремума неоднородности поля.

На рис. 3, а показаны измеренные значения магнитной силы F в зависимости от объемной доли γ частиц магнитного сорбента в образце при напряженности воздействующего поля $H = 61$ кА/м; на рис. 3, б представлены соответствующие данные для магнитной восприимчивости $\langle\chi\rangle$ образца. Отчетливо видно, что зависимость F от γ , как и последовавшая из нее зависимость $\langle\chi\rangle$ от γ , действительно имеет два выраженных участка, причем первый из них (начальный), где $\langle\chi\rangle \sim \gamma$, распространяется до сравнительно умеренного (здесь критериального) значения $\gamma = [\gamma] \cong 0,15 \dots 0,2$.

Следовательно, можно найти значение приведенной магнитной восприимчивости разреженного (при $\gamma \leq [\gamma]$) образца используемого магнитного сорбента, т.е. значение $\langle\chi\rangle/\gamma$ или, что то же самое — искомое в соответствии с (2) значение магнитной восприимчивости χ частиц (условно уединенных) этого сорбента. Так, частное значение $\chi = \langle\chi\rangle/\gamma$, усредненное для

всего упомянутого линейного участка зависимости $\langle\chi\rangle$ от γ (см. рис. 3, б), составляет $\chi = 0,095$.

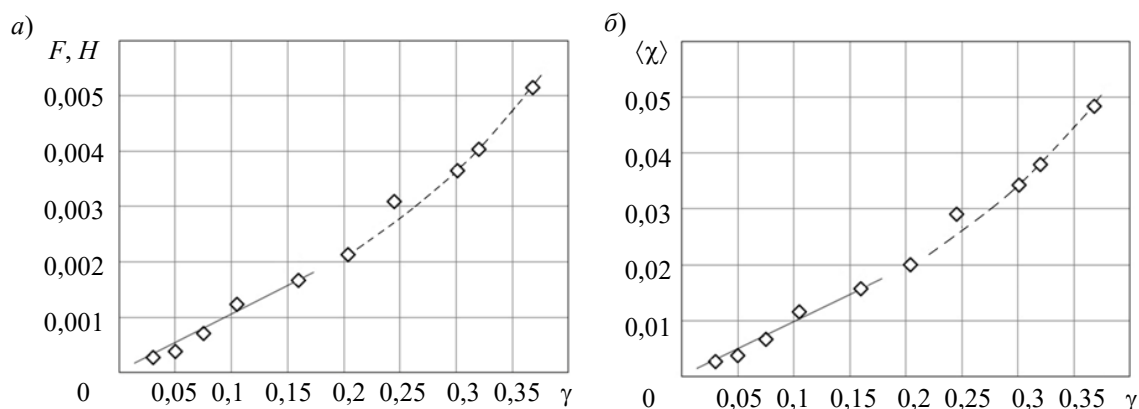


Рис. 3

Относительно возможности получения развернутой (по H) характеристики значений $\langle\chi\rangle/\gamma = \chi$, то для этого можно воспользоваться методологически оправданным вариантом упрощенной оперативной оценки таких значений. Так, для многих порошковых разреженных образцов практически типичным является степенной вид зависимостей значений $\langle\chi\rangle/\gamma = \chi$ от H (в постэкстремальной области такого рода зависимостей) с показателем степени $z = 0,7 \dots 0,8 \cong 0,75$ [18, 19]. Тогда, имея в распоряжении всего лишь одно значение $\langle\chi\rangle/\gamma = \chi$, в данном частном случае $(\langle\chi\rangle/\gamma)_1 = \chi_1 = 0,095$ (напомним, при $H = H_1 = 61$ кА/м), для определения значений $\langle\chi\rangle/\gamma = \chi$ при иных величинах H приемлемым становится следующее расчетное выражение:

$$\frac{\langle\chi\rangle}{\gamma} = \chi = \left(\frac{\langle\chi\rangle}{\gamma} \right)_1 \cdot \left(\frac{H_1}{H} \right)^z. \quad (4)$$

Согласно (4), например, при увеличенных значениях $H = 200$ кА/м и $H = 500$ кА/м магнитная восприимчивость $\chi = \langle\chi\rangle/\gamma$ тех же изучаемых частиц магнитного сорбента уменьшается до значений соответственно $\chi = 0,039$ и $\chi = 0,02$. Получаемые значения χ в соответствии с (1) должны служить основой для выбора режимов и устройств, обеспечивающих магнитный захват и технологическое выделение частиц отработанного сорбента из очищаемой воды для утилизации или регенерации.

Закключение. При использовании порошковых магнитных сорбентов, в частности углеродных с включениями магнетита и маггемита, в технологии очистки вод, когда одной из ключевых стадий этой технологии является магнитное выделение частиц отработанного сорбента, актуальной становится задача контроля магнитной восприимчивости χ этих частиц. Контроль может быть осуществлен по данным экспериментально получаемой зависимости магнитной восприимчивости $\langle\chi\rangle$ дисперсного образца магнитного сорбента от объемной доли γ его частиц. На примере зависимости $\langle\chi\rangle$ от γ , найденной с применением модернизированного магнетометра пондеромоторного типа с полюсами-полусферами для создания зоны практически стабильной неоднородности поля, показано наличие на графической кривой принципиально важного участка прямой пропорциональности: начального — при $\gamma \leq 0,15 \dots 0,2$, когда вследствие разобщения частиц их магнитное взаимодействие практически отсутствует. С использованием значений $\langle\chi\rangle$ из этого участка при напряженности поля $H = 61$ кА/м определено значение магнитной восприимчивости частицы: $\chi = 0,095$.

Развернутую же зависимость χ от H (убывающую в ее характерной постэкстремальной области) можно найти на основе частного значения χ , полагаясь на известный в подобных задачах обратный степенной вид такой зависимости с показателем степени 0,7...0,8. Получаемая информация о магнитной восприимчивости χ способствует установлению режимов захвата частиц сорбента в соответствующей системе очистки сточных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фоменкова А.А. Анализ работоспособности систем анаэробной биологической очистки сточных вод в процессе эксплуатации // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 2. С. 140—147. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-140-147.
2. Xiao H., Huang D., Pan Y., Liu Y., Song K. Fault diagnosis and prognosis of wastewater processes with incomplete data by the auto-associative neural networks and ARMA model // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2017. Vol. 161. P. 96—107. DOI:10.1016/j.chemolab.2016.12.009.
3. Веденяпина М. Д., Курмышева А. Ю., Кряжев Ю. Г., Ершова В. А. Магнитные железосодержащие углеродные материалы как сорбенты для извлечения загрязнителей из водных сред: обзор // Химия твердого топлива. 2021. № 5. С. 15—37. DOI:10.31857/S0023117721050078.
4. Mohan D., Sarswat A., Singh V. K., Alexandre-Franco M., Pittman Jr. C. U. Development of magnetic activated carbon from almond shells for trinitrophenol removal from water // Chemical Engineering Journal. 2011. Vol. 172. P. 1111—1125. DOI:10.1016/j.cej.2011.06.054.
5. Feng Z., Chen H., Li H., Yuan R., Wang F., Chen Z., Zhou B. Preparation, characterization, and application of magnetic activated carbon for treatment of biologically treated papermaking wastewater // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 713. P. 136423. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.136423.
6. Jiang Y., Xie Q., Zhang Y., Geng C., Yu B., Chi J. Preparation of magnetically separable mesoporous activated carbons from brown coal with Fe_3O_4 // International Journal of Mining Science and Technology. 2019. Vol. 29. P. 513—519. DOI:10.1016/j.ijmst.2019.01.002.
7. Liu Y., Huo Z., Song Z., Zhang C., Ren D., Zhong H., Jin F. Preparing a magnetic activated carbon with expired beverage as carbon source and KOH as activator // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2019. Vol. 96. P. 575—587. DOI:10.1016/j.jtice.2018.11.017.
8. Ito D., Nishimura K., Miura O. Removal and recycle of phosphate from treated water of sewage plants with zirconium ferrite adsorbent by high gradient magnetic separation // Journal of Physics: Conf. Series. 2009. Vol. 156. P. 012033. DOI:10.1088/1742-6596/156/1/012033.
9. Xue Z., Wang Y., Zheng X., Lu D., Li X. Particle capture of special cross-section matrices in axial high gradient magnetic separation: A 3D simulation // Separation and Purification Technology. 2020. Vol. 237. P. 116375. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116375.
10. 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 // Review of Scientific Instruments. 2018. Vol. 89. P. 105103. DOI: 10.1063/1.5016570.
11. Watarai H., Suwa M., Iiguni Y. Magnetophoresis and electromagnetophoresis of microparticles in liquids // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2004. Vol. 378. P. 1693—1699. DOI: 10.1007/s00216-003-2354-7.
12. Sinha S., Ganguly R., De A. K., Puri I. K. Single magnetic particle dynamics in a microchannel // Physics of Fluids. 2007. Vol. 19. P. 117102. DOI:10.1063/1.2780191.
13. Zeng J., Tong X., Yi F., Chen L. Selective capture of magnetic wires to particles in high gradient magnetic separation // Minerals. 2019. Vol. 9 (9). P. 509. DOI: 10.3390/min9090509.
14. Mariani G., Fabbri M., Negrini F., Ribani P. L. High-Gradient Magnetic Separation of pollutant from wastewaters using permanent magnets // Separation and Purification Technology. 2010. Vol. 72. P. 147—155. DOI:10.1016/j.seppur.2010.01.017.
15. 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 // Advanced Materials. 2015. Vol. 27. P. 2507—2514. DOI: 10.1002/adma.201405757.

16. Baik S. K., Ha D. W., Ko R. K., Kwon J. M. Magnetic field analysis of high gradient magnetic separator via finite element analysis // *Physica C*. 2012. Vol. 480. P. 111—117. DOI:10.1016/j.physc.2012.04.036.
17. Wu T. H., Mao J. H., Wang J. T., Wu J. Y., Xie Y. B. A New On-Line Visual Ferrograph // *Tribology Trans.* 2009. Vol. 52. P. 623—631. DOI:10.1080/10402000902825762.
18. Сандуляк А. А., Сандуляк А. В., Киселев Д. О., Сандуляк Д. А., Полисмакова М. Н., Еришова В. А. О методе получения данных магнитной восприимчивости феррочастиц порошков по концентрационным и полевым зависимостям их восприимчивости // *Приборы*. 2018. № 11 (221). С. 43—51.
19. Sandulyak A. A., Sandulyak A. V., Ershova V., Pamme N., Ngmasom B., Iles A. Definition of a magnetic susceptibility of conglomerates with magnetite particles. Particularities of defining single particle susceptibility // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. Vol. 441. P. 724—734. DOI:10.1016/j.jmmm.2017.06.027.
20. Головин В. А., Тюрина С. А., Щелков В. А. Современные подходы к снижению наклепобразования в теплообменном оборудовании // *Russian Technological Journal*. 2022. Т. 10, № 3. С. 93—102. DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-3-93-102.
21. Ngomsik A-F., Bee A., Draye M., Cote G., Cabuil V. Magnetic nano- and microparticles for metal removal and environmental applications: a review // *C. R. Chimie*. 2005. Vol. 8. P. 963—970. DOI:10.1016/j.crci.2005.01.001.
22. Yavuz C. T., Mayo J. T., Yu W. W. et al. Low-Field Magnetic Separation of Monodisperse Fe₃O₄ Nanocrystals // *Science*. 2006. Vol. 314. P. 964—967. DOI: 10.1126/science.1131475.
23. Sun J., Zhang Y., Chen Z., Zhou J., Gu N. Fibrous aggregation of magnetite nanoparticles induced by a time-varied magnetic field // *Angew. Chem. Intern. Ed.* 2007. Vol. 46. P. 4767—4770 DOI: 10.1002/anie.200604474.
24. Bjork R., Zhou Z. The demagnetization factor for randomly packed spheroidal particles // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2019. Vol. 476. P. 417—422. DOI:10.1016/j.jmmm.2019.01.005.
25. Diguët G., Beaunon E., Cavaillé J. Y. Shape effect in the magnetostriction of ferromagnetic composite // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2010. Vol. 322. P. 3337—3341. DOI:10.1016/j.jmmm.2010.06.020.
26. 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. Vol. 124. P. 123901. DOI: 10.1063/1.5041750.
27. Казин П.Е., Кульбакин И.В. Методы исследования магнитных свойств материалов. М.: МГУ, 2011. 34 с.
28. Пат. 2789620 РФ. Электромагнитное устройство для создания неоднородного магнитного поля с зоной его стабильной неоднородности / А. А. Сандуляк, Д. А. Сандуляк, В. А. Еришова, М. Н. Полисмакова, А. В. Сандуляк, Д. О. Киселев. 06.02.2023 г.

Сведения об авторах

- | | |
|--------------------------------------|---|
| Дарья Александровна Сандуляк | — канд. техн. наук; МИРЭА — Российский технологический университет, кафедра приборов и информационно-измерительных систем; доцент; E-mail: d.sandulyak@mail.ru |
| Анна Александровна Сандуляк | — д-р техн. наук, профессор; МИРЭА — Российский технологический университет, кафедра приборов и информационно-измерительных систем; E-mail: anna.sandulyak@mail.ru |
| Мария Николаевна Полисмакова | — канд. техн. наук, доцент; МИРЭА — Российский технологический университет, кафедра приборов и информационно-измерительных систем; E-mail: m.polismakova@mail.ru |
| Вера Александровна Еришова | — канд. техн. наук; МИРЭА — Российский технологический университет, лаборатория магнитного контроля и разделения материалов; ст. научный сотрудник; E-mail: v.ershova@mail.ru |
| Александр Васильевич Сандуляк | — д-р техн. наук, профессор; МИРЭА — Российский технологический университет, кафедра приборов и информационно-измерительных систем; E-mail: a.sandulyak@mail.ru |
| Александра Юрьевна Курмышева | — канд. техн. наук; Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН, лаборатория жидкофазных каталитических и электрокаталитических процессов; научный сотрудник; МГТУ СТАНКИН, лаборатория искрового плазменного спекания; E-mail: aukurm@gmail.com |
| Игорь Анатольевич Соловьев | — аспирант; МИРЭА — Российский технологический университет, кафедра приборов и информационно-измерительных систем; E-mail: sia8811@mail.ru |

Поступила в редакцию 21.02.2023; одобрена после рецензирования 14.03.2023; принята к публикации 31.05.2023.

REFERENCES

1. Fomenkova A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 2, pp. 140–147, DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-140-147. (in Russ.)
2. Xiao H., Huang D., Pan Y., Liu Y., Song K. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2017, vol. 161, pp. 96–107, DOI:10.1016/j.chemolab.2016.12.009.
3. Vedenyapina M.D., Kurmysheva A.Y., Ershova V.A., Kryazhev Y.G. *Solid Fuel Chemistry*, 2021, no. 5, pp. 285–305, DOI:10.31857/S0023117721050078.
4. Mohan D., Sarswat A., Singh V. K., Alexandre-Franco M., Pittman Jr. C.U. *Chemical Engineering Journal*, 2011, vol. 172, pp. 1111–1125, DOI:10.1016/j.cej.2011.06.054.
5. Feng Z., Chen H., Li H., Yuan R., Wang F., Chen Z., Zhou B. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 713, pp. 136423, DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.136423.
6. Jiang Y., Xie Q., Zhang Y., Geng C., Yu B., Chi J. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, vol. 29, pp. 513–519, DOI:10.1016/j.ijmst.2019.01.002.
7. Liu Y., Huo Z., Song Z., Zhang C., Ren D., Zhong H., Jin F. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2019, vol. 96, pp. 575–587, DOI:10.1016/j.jtice.2018.11.017.
8. Ito D., Nishimura K., Miura O. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, vol. 156, pp. 012033, DOI:10.1088/1742-6596/156/1/012033.
9. Xue Z., Wang Y., Zheng X., Lu D., Li X. *Separation and Purification Technology*, 2020, vol. 237, pp. 116375, DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116375.
10. Liu Y.-L., Li D.-W., He J. et al. *Review of Scientific Instruments*, 2018, vol. 89, pp. 105103, DOI: 10.1063/1.5016570.
11. Watarai H., Suwa M., Iguni Y. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2004, vol. 378, pp. 1693–1699, DOI:10.1007/s00216-003-2354-7.
12. Sinha S., Ganguly R., De A.K., Puri I.K. *Physics of Fluids*, 2007, vol. 19, pp. 117102, DOI:10.1063/1.2780191.
13. Zeng J., Tong X., Yi F., Chen L. *Minerals*, 2019, vol. 9(9), pp. 509, DOI: 10.3390/min9090509.
14. Mariani G., Fabbri M., Negrini F., Ribani P. L. *Separation and Purification Technology*, 2010, vol. 72, pp.147–155, DOI:10.1016/j.seppur.2010.01.017.
15. Hu K., Sun J., Guo Z. et al. *Advanced Materials*, 2015, vol. 27, pp. 2507–2514, DOI: 10.1002/adma.201405757.
16. Baik S.K., Ha D.W., Ko R.K., Kwon J.M. *Physica C*, 2012, vol. 480, pp. 111–117, DOI:10.1016/j.physc.2012.04.036.
17. Wu T.H., Mao J.H., Wang J.T., Wu J.Y., Xie Y.B. *Tribology Transactions*, 2009, vol. 52, pp. 623–631, DOI:10.1080/10402000902825762.
18. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Kiselev D.O., Sandulyak D.A., Polismakova M.N., Ershova V.A. *Pribery*, 2018, no. 11(221), pp. 43–51. (in Russ.)
19. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Ershova V., Pamme N., Ngmasom B., Iles A. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 441, pp. 724–734, DOI:10.1016/j.jmmm.2017.06.027.
20. Golovin V.A., Tyurina S.A., Shchelkov V.A. *Russian Technological Journal*, 2022, no. 3(10), pp. 93–102, DOI:10.32362/2500-316X-2022-10-3-93-102. (in Russ.)
21. Ngomsik A.-F., Bee A., Draye M., Cote G., Cabuil V. C.R. *Chimie*, 2005, vol. 8, pp. 963–970, DOI:10.1016/j.crci.2005.01.001.
22. Yavuz C.T., Mayo J.T., Yu W.W. et al. *Science*, 2006, vol. 314, pp. 964–967, DOI: 10.1126/science.1131475.
23. Sun J., Zhang Y., Chen Z., Zhou J., Gu N. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2007, vol. 46, pp. 4767–4770, DOI: 10.1002/anie.200604474.
24. Bjork R., Zhou Z. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 476, pp. 417–422, DOI:10.1016/j.jmmm.2019.01.005.
25. Diguët G., Beaunon E., Cavaillé J.Y. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, vol. 322, pp. 3337–3341, DOI:10.1016/j.jmmm.2010.06.020.
26. Bai K., Casara J., Nair-Kanneganti A., Wahl A., Carle F., Brown E. *Journal of Applied Physics*, 2018, vol. 124, pp. 123901, DOI: 10.1063/1.5041750.
27. Kazin P.E., Kulbakin I.V. *Metody issledovaniya magnitnykh svoystv materialov* (Methods for Studying the Magnetic Properties of Materials), Moscow, 2011, 34 p. (in Russ.)
28. Patent RU 2789620, *Elektromagnitnoye ustroystvo dlya sozdaniya neodnorodnogo magnitnogo polya s zonoy yego stabil'noy neodnorodnosti* (An Electromagnetic Device for Creating an Inhomogeneous Magnetic Field with a Zone of Its Stable Inhomogeneity), A.A. Sandulyak, D.A. Sandulyak, V.A. Ershova, M.N. Polismakova, A.V. Sandulyak, D.O. Kiselev, Priority 06.02.2023. (in Russ.)

Data on authors

- | | |
|-----------------------------|---|
| Darya A. Sandulyak | — PhD; MIREA – Russian Technological University, Department of Instruments and Information Measuring Systems; Associate Professor;
E-mail: d.sandulyak@mail.ru |
| Anna A. Sandulyak | — Dr. Sci., Professor; MIREA – Russian Technological University, Department of Instruments and Information Measuring Systems;
E-mail: anna.sandulyak@mail.ru |
| Maria N. Polismakova | — PhD, Associate Professor; MIREA – Russian Technological University, Department of Instruments and Information Measuring Systems;
E-mail: m.polismakova@mail.ru |

- Vera A. Ershova** — PhD; MIREA – Russian Technological University, Laboratory of Magnetic Control and Material's Separation; Senior Researcher;
E-mail: v.ershova@mail.ru
- Alexander V. Sandulyak** — Dr. Sci., Professor; MIREA – Russian Technological University, Department of Instruments and Information Measuring Systems;
E-mail: a.sandulyak@mail.ru
- Alexandra Yu. Kurmysheva** — PhD; N. D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry of the RAS, Laboratory of Liquid-phase Catalytic and Electrocatalytic Processes; Researcher; Moscow State University of Technology "STANKIN"; E-mail: aukurm@gmail.com
- Igor A. Solovev** — Post-Graduate Student; MIREA – Russian Technological University, Department of Instruments and Information Measuring Systems;
E-mail: sia8811@mail.ru

Received 21.02.2023; approved after reviewing 14.03.2023; accepted for publication 31.05.2023.