

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 537.621.4 + 537.622.4 + 621.317.412

РЕАЛИЗАЦИЯ МАГНИТНО-РЕОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ЧАСТИЦЫ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЕЕ ИСКУССТВЕННОГО ЗАВИСАНИЯ

© 2024 г. Д. А. Сандуляк^{a,*}, А. А. Сандуляк^a, В. А. Ершова^a, А. В. Сандуляк^a,
М. Н. Полисмакова^a, А. С. Харин^a

^a МИРЭА – Российский технологический университет

Россия, 107076, Москва, ул. Стромынка 20

* e-mail: d.sandulyak@mail.ru

Поступила в редакцию 20.03.2024 г.

После доработки 27.05.2024 г.

Принята к публикации 28.06.2024 г.

Магнитометр с полюсами-полусферами позволяет, следуя новому магнитно-реологическому методу, определять магнитную восприимчивость χ одиночной частицы малых размеров (перемещающейся в столбе жидкости между полюсами-полусферами). Обосновывается, что возможности этого метода могут быть расширены за счет использования при выполнении экспериментов той части области между полюсами, которая находится ниже (а не изначально выше) их межцентральной линии. В этом случае, когда изучаемая частица принудительно перемещается вверх, что обуславливает снижение скорости и увеличение времени ее перемещения, можно целенаправленно замедлять такое перемещение (изменением намагничивающей силы магнитометра) вплоть до зависания частицы. Для случая такого зависания приводятся выражения (оказавшиеся облегченными), которые позволяют определять χ по значительно суженному кругу данных, необходимых для выполнения экспериментов и соответствующих расчетов.

~~Ключевые слова: магнитоактивная частица, магнитная восприимчивость частицы, неоднородное поле, принудительное перемещение и зависание частицы.~~

1. ВВЕДЕНИЕ

Определение магнитных свойств образцов малого объема (на уровне дисперсных частиц) является не только научной, но и актуальной практической задачей. Так, сведения о магнитной восприимчивости частиц особо востребованы в технологиях магнитной сепарации при очистке многих сред от разного рода ферромагнитных (ферримагнитных) примесей [1, 2], очистки сточных вод с применением магнитоактивных дисперсных сорбентов

[3, 4], адресной доставки магнитовосприимчивых частиц (как активных носителей медицинского препарата) в биологии и медицине [5–7].

Из известных методов контроля магнитных свойств материалов [8, 9] для специфичной задачи определения магнитных свойств образцов малого объема предпочтительны пондеромоторный метод [10–12], основанный на измерении магнитной силы F_m , действующей на образец, находящийся в неоднородном (градиентном) магнитном поле магнитометра. В работах [10, 13] найдены решения двух принципиальных вопросов, позволяющие развить этот метод магнитометрии. Во-первых, за счет применения полюсных наконечников сферической формы удалось добиться получения столь необходимой зоны (диагностируемой) постоянного магнитного силового фактора (представляющего собой произведение $B \text{grad} B$, где B – индукция поля) для размещения в ней изучаемого малообъемного образца. Во-вторых, на основании исследований подвергаемых разрежению порошкообразных образцов показано, что при уменьшении объемной доли магнитоактивных частиц в образце, когда достигается взаимное разобщение этих частиц, по найденным данным магнитной восприимчивости разреженного образца (с использованием измеряемой величины F_m) поддается оценке магнитная восприимчивость отдельной частицы.

Вместе с тем надо иметь в виду, что такой подход дает представление о магнитной восприимчивости среднестатистической частицы без информации о восприимчивости той или иной отдельно взятой частицы.

Метод, предназначенный для определения магнитной восприимчивости χ именно одиночной частицы, описывается в работах [14, 15]. Этот метод, именуемый магнитно-реологическим (МР) [14, 15], формально основывается на том же принципе, что и широко известный метод вискозиметрии, осуществляемый посредством естественной вертикальной седиментации шара в столбе жидкости. Получение здесь искомого результата, а именно динамической вязкости изучаемой жидкости, базируется на условии баланса действующих на шар трех постоянных сил: гравитационной F_g , силы Архимеда F_A и силы Стокса F_S .

Для получения МР-методом искомого результата, а именно значений χ для изучаемой частицы, эта частица, помещаемая в жидкость, дополнительно подвергалась воздействию магнитной силы F_m , зависящей от χ , при соблюдении принципиальных требований: сила F_m обязательно должна быть постоянной по величине и, кроме того, строго ориентированной по направлению действия сил F_g , F_A и F_S [14, 15]. Это вполне обеспечивается применением в соответствующем магнитометре полюсов сферической формы. В таком случае частица будет совершать вертикальное принудительное перемещение в столбе жидкости, и при выполнении определенных условий [14, 15] справедливым останется

условие баланса сил (здесь четырех), что позволяет получать в явном виде необходимые выражения для расчета χ .

При реализации МР-метода согласно работам [14, 15] осуществляется вертикальное перемещение изучаемой частицы в столбе жидкости вниз. В необходимом для определения магнитной восприимчивости χ изучаемой частицы условии баланса сил (в пределах исполнительной зоны, расположенной в межполюсной области выше межцентральной линии полюсных наконечников) здесь такие силы, как гравитационная F_g и магнитная F_m , совпадают по направлению. В связи с этим изучаемая частица в исполнительной зоне (где магнитная сила выдерживается практически постоянной вследствие сохраняющегося почти постоянным магнитного силового фактора) [14, 15] перемещается сравнительно быстро, так как эта зона, к сожалению, вынужденно ограничена по протяженности h . Поэтому время такого перемещения частицы является весьма малым, его регистрация вызывает затруднения, что может негативно сказаться на точности измерений и, в конечном счете, на точности контроля данных χ . Следовательно, изучение возможности исключения такого, регистрируемого при реализации МР-метода, параметра, как время τ перемещения изучаемой частицы (что составило цель данной работы), позволило бы раскрыть новые возможности этой перспективной, на наш взгляд, методологии магнитометрии.

2. АРГУМЕНТАЦИЯ ПЕРЕХОДА К МР-МЕТОДУ С РАСШИРЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

Возможности МР-метода (при реализации которого целенаправленно используется электромагнитная система с полюсными наконечниками сферической формы [14, 15]) позволяют несложно уменьшать скорость вертикального перемещения изучаемой частицы (в том числе в пределах исполнительной зоны протяженностью h) и значит увеличивать время этого перемещения, принимая во внимание следующее. Когда применяются полюсные наконечники сферической формы, координатная характеристика магнитного силового фактора $B_{grad}B$ в любом из радиальных направлений плоскости симметрии межполюсной области имеет экстремальный вид [10, 11]. Следовательно, зона в окрестности экстремума, где значения этого фактора практически постоянны, являясь исполнительной зоной, содержится по вертикали как выше, так и симметрично ниже межцентральной линии полюсных наконечников. Поэтому для желательного снижения скорости перемещения изучаемой частицы и увеличения за счет этого времени τ ее перемещения (в пределах исполнительной зоны протяженностью h) при реализации МР-метода можно использовать также нижнюю исполнительную зону (рис. 1) [16]. Здесь сила тяжести F_g , направленная вниз,

и магнитная сила F_m , направленная вверх, противодействуют друг другу, что обусловит не только изменение направления перемещения изучаемой частицы, но и существенное уменьшение скорости и увеличение времени t ее перемещения.

Тем самым при такой, как бы обратной, седиментации обеспечивается замедленное (по сравнению с реализацией МР-метода в работах [14, 15], когда F_g и F_m – однонаправлены) перемещение изучаемой частицы (вверх, в пределах такой же вынуждено ограниченной величины h). При соблюдении указанных в работах [14, 15] требований магнитную восприимчивость частицы χ можно определять, исходя из справедливого здесь [16] (скорректированного по сравнению с работами [14, 15]) условия баланса сил (рис. 1): $F_g - F_A + F_S - F_m = 0$, а именно, гравитационной силы $F_g = \pi\delta^3\rho g/6 = \rho Vg$, силы Архимеда $F_A = \pi\delta^3\rho_1 g/6 = \rho_1 Vg$, силы Стокса $F_S = 3k\pi\delta\eta v = 3k\pi\delta\eta h/\tau$ (при соблюдении ламинарного режима, т.е. при малых числах Рейнольдса, когда $Re = v\delta\rho_1/\eta < 2$ [17], скорость частицы v в жидкости постоянная при установившемся режиме движения частицы в пределах ее перемещения h по высоте столба жидкости), а также магнитной силы $F_m = \mu_0\chi VH\text{grad}H = \chi VB\text{grad}B/\mu_0$. Здесь η и ρ_1 – динамическая вязкость и плотность используемой жидкости; δ , ρ , V – соответственно эквивалентный диаметр частицы (уподобляемой модельной шарообразной), ее плотность и объем; $k = 1/\varphi$ – коэффициент, учитывающий отличие формы изучаемой частицы от модельной сферической (φ – отношение скоростей седиментации частицы и модельной сферической частицы, по данным работы [17] $\varphi = 0.66\dots 0.77$ для разных несферических частиц: угловатых и округлой формы), g – ускорение свободного падения (9.81 м/с^2), B – индукция поля в точке местоположения частицы, μ_0 – магнитная константа ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$). Тогда из оговоренного условия баланса сил последует выражение для определения магнитной восприимчивости χ частицы (совершающей замедленное вертикальное перемещение вверх) [16].

Как следует из простого упоминания параметров, значениями которых необходимо располагать для реализации МР-метода (при определении магнитной восприимчивости χ изучаемой частицы) [14–16], их количество значительно – около десятка. Между тем, информацию о χ можно получить, используя данные менее половины из них, используя еще одну из доступных возможностей МР-метода.

Для этого опыт по вертикальному перемещению изучаемой частицы 3 вверх в столбе жидкости 2 следует осуществлять в режиме магнитного управления, изменяя магнитные параметры (такие как индукция B и, соответственно, градиент $\text{grad}B$) изменением намагничивающей силы электромагнитной системы магнитометра 1 (рис. 1) [18]. При этом следует осуществлять варьирование токовой нагрузки (непосредственно при проведении опыта), вызывая сначала перемещение изучаемой частицы 3 вверх, а затем торможение в

перемещении частицы вплоть до ее зависания: когда скорость перемещения v частицы станет равняться нулю (рис. 1). Тем самым, в состоянии зависания частицы сила Стокса исчезает ($F_S = 0$) и составляемое ключевое условие баланса действующих на частицу сил записывается здесь без этой силы:

$$F_g - F_A - F_m = 0. \quad (1)$$

Тогда искомая магнитная восприимчивость χ изучаемой частицы определяется, исходя из этого – суженного – условия (по сравнению с записанным выше), т.е. без фигурирующей в нем силы F_S , с помощью записанных выше выражений для F_g , F_A и F_m :

$$\chi = g (\rho - \rho_\eta) \mu_0 / B \text{grad} B, \quad (2)$$

что исключает необходимость трудоемкого определения динамической вязкости η жидкости и эквивалентного диаметра δ частицы. При этом из устанавливаемой координатной характеристики B , а также из получаемой на ее основе координатной характеристики $\text{grad} B$ определяются значения этих параметров в точке зависания частицы.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возможности предложенного нового метода определения магнитной восприимчивости χ такого специфичного ферромагнетика (ферримангнетика), как одиночная частица малых размеров, рассматриваются на основании анализа конкуренции сил, в том числе магнитной (зависящей от χ), действующих на изучаемую частицу, перемещающуюся по вертикали в сосуде с жидкостью, помещенном между полюсами электромагнитной системы соответствующего магнитометра. Мы обращаем внимание на то, что в случае применения полюсов-полусфер эти возможности могут быть расширены за счет использования при выполнении экспериментов той части межполюсной области, которая находится ниже (а не изначально выше) межцентральной линии полюсов. В этом случае, когда обеспечивается перемещение (принудительное) изучаемой частицы вверх, что обуславливает снижение скорости и увеличение времени перемещения частицы, можно также подконтрольно замедлять ее перемещение (изменением намагничивающей силы магнитометра) вплоть до зависания. Для случая зависания частицы приводятся выражения (оказавшиеся облегченными по числу фигурирующих в них параметров), которые позволяют определять χ по значительно суженному кругу данных, получаемых при выполнении экспериментов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Госзадания в сфере науки (проект FSFZ-2024-0005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ku J., Lei Z., Lin H., Yan Q., Chen H., Guo B.* // International Journal of Mining Science and Technology. 2022. V. 32 (6). P. 1341. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.08.007>.
2. *Cooper R.P., Doyle J.F., Dunn D.S., Vellinger J.C., Todd P.W.* // Separation Science and Technology. 2004. V. 39 (12). P. 2809. <https://doi.org/10.1081/SS-200028762>
3. *Feng Z., Chen H., Li H., Yuan R., Wang F., Chen Z., Zhou B.* // Science of the Total Environment. 2020. V. 713. P. 136423. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136423>
4. *Bagheri A.R., Ghaed M., Asfaram A., Bazrafshan A.A., Jannesar R.* // Ultrasonics Sonochemistry. 2017. V. 34. P. 294. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2016.05.047>
5. *Орлов В.А., Прокопенко В.С., Руденко Р.Ю., Орлова И.Н.* // Физика металлов и металлургия. 2020. Т. 121. № 11. С. 1135. <https://doi.org/10.31857/S0015323020100071>
6. *Vitol E.A., Novosad V., Rozhkova E.A.* // Nanomedicine. 2012. V. 7 (10). P. 1611. <https://doi.org/10.2217/nmm.12.133>
7. *Cardoso V.F., Francesko A., Ribeiro C., Bañobre-López M., Martins P., Lanceros-Mendez S.* // Adv. Healthcare Mater. 2018. V. 7. P.1700845. <https://doi.org/10.1002/adhm.201700845>.
8. *Riminucci A., Uhlarz M., De Santis R., Herrmannsdörfer T.* // Journal of Applied Physics. 2017. V. 121. P. 094701. <https://doi.org/10.1063/1.4977719>
9. *Slobinsky D., Borzi R.A., Mackenzie A.P., Grigera S.A.* // Review of Scientific Instruments. 2012. V. 83. P. 125104. <https://doi.org/10.1063/1.4769049>
10. *Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Полисмакова М.Н., Киселев Д.О., Ершова В.А., Сандуляк Д.А.* // ПТЭ. 2018. № 1. С. 109. <https://doi.org/10.7868/S0032816218010342>
11. *Сандуляк А.А., Сандуляк Д.А., Полисмакова М.Н., Ершова В.А., Сандуляк А.В.* // ПТЭ. 2023. № 4. С. 116. <https://doi.org/10.1134/S0020441223030107>
12. *Казин П.Е., Кульбакин И.В.* Методы исследования магнитных свойств материалов. М.: МГУ. 2011.
13. *Sandulyak A.V., Sandulyak A.A., Ershova V.A., Sandulyak D.A., Polismakova M.N., Kiselev D.O.* // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2020. V. 93. P. 210. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10891-020-02110-x>
14. *Сандуляк А.А., Сандуляк Д.А., Полисмакова М.Н., Сандуляк А.В., Ершова В.А., Киселев Д.О.* // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2023. № 5. С. 1. <https://doi.org/10.25791/pribor.11.2023.1450>
15. *Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Ершова В.А., Сандуляк Д.А.* РФ Патент 2753159, 2021.
16. *Сандуляк А.А., Сандуляк Д.А., Полисмакова М.Н., Сандуляк А.В., Харин А.С., Соловьев И.А.* РФ Патент, 2023.

17. *Касаткин А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973.
18. *Сандуляк Д.А., Сандуляк А.А., Ершова В.А., Сандуляк А.В., Полисмакова М.Н.* РФ Патент, 2024.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Иллюстрация магнитно-реологического метода контроля магнитной восприимчивости одиночной частицы с обеспечением ее искусственного зависания: 1 – полюсные наконечники (сферической формы) электромагнитной системы магнитометра, 2 – столб жидкости, в которой осуществляется перемещение изучаемой частицы 3 с последующим зависанием ($v = 0$) в точке с определенным значением магнитного силового фактора.

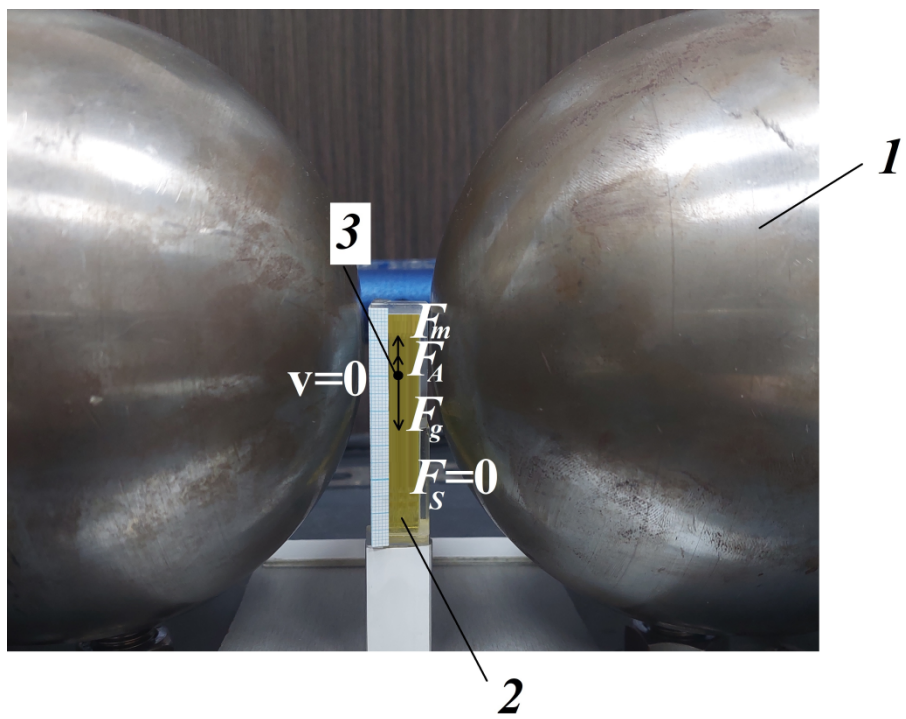


Рис. 1

Для связи с авторами:

Сандуляк Дарья Александровна
Тел. 8-925-060-95-81, 8-926-569-03-25
(со старой карточки)

Е-mail: d.sandulyak@mail.ru

Сандуляк Анна Александровна

Е-mail: anna.sandulyak@mail.ru

Полирмакова Мария Николаевна

Е-mail: m.polismakova@mail.ru

Ершова Вера Александровна

Е-mail: v.ershova@mail.ru

Сандуляк Александр Васильевич

Е-mail: a.sandulyak@mail.ru

Для переводчика:

~~IMPLEMENTATION OF MAGNETIC RHEOLOGICAL METHOD FOR CONTROL-
LING MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF PARTICLE WHILE ENSURING ITS ARTI-
FICIAL HANGING~~

~~D. A. Sandulyak, A. A. Sandulyak, V. A. Ershova, A. V. Sandulyak, M. N. Polismakova,
A. S. Kharin~~

~~MIREA – Russian Technological University~~

~~The magnetometer with hemisphere pole pieces along new magnetic-rheological method (MR method) allows to determine the magnetic susceptibility χ of a single small particle moving in a liquid column. It is justified that the capabilities of the MR method can be expanded by using the part of the area between the poles that is below (and not initially above) the intercentral pole line when performing experiment. In this case, when the studied particle is constrained moved upward, which causes a decrease in speed and an increase in the time of its movement, it is possible to purposefully slow down such movement (by changing the magnetizing force of the magnetometer) – until the hanging of particle. For the case of such hanging, expressions are given (which turned out to be light), which allow you to determine the χ from a significantly narrowed range of data necessary for you to complete experiments and corresponding calculations.~~

~~**Keywords:** magnetoactive particle, magnetic susceptibility of particle, inhomogeneity magnetic field, constrained moving and hanging of particle.~~